

Konstruktiv- medizintechnische und strukturanalytische Entwicklung eines Patientenauflegesystems zur Optimierung intensivmedizinischer Prozessketten

Dissertation

zur Erlangung
des Grades Doktor- Ingenieur
- Dr.-Ing. –
des Fachbereiches Maschinenwesen
der Universität Duisburg-Essen
Standort Essen

vorgelegt von
Diplom- Ingenieur
Thomas Krell
aus Duderstadt

Mündliche Prüfung: 12.11.2003

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. E. von Lavante

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. D. Wissussek

Prof. Dr.-Ing. D. Bergers

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik des Fachbereiches Maschinenwesen der Universität Duisburg- Essen am Standort Essen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. Dieter Wissussek, der durch seine stets sehr konstruktiven Anregungen und fachliche Unterstützung diese Arbeit mitgestaltet hat.

Bei Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. Diethard Bergers, Fachgebiet Produktionstechnologie und Produktentwicklung, möchte ich mich für das Korreferat bedanken und für die zur Verfügung gestellten Mittel, Möglichkeiten und Mitarbeiter.

Für den Prüfungsvorsitz danke ich besonders Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. Ernst von Lavante.

Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. Hans- Joachim Stracke, der mir als Vorgesetzter stets die Freiräume zur Erstellung dieser fächer-übergreifenden Arbeit gegeben hat, gilt mein besonderer Dank. Weiterhin danke ich Ihm für seine Anregungen zur Erstellung dieser Arbeit, seine Offenheit und Unterstützung in jeglicher Art.

Für die finanziellen Mittel der Entwicklung möchte ich mich bei Herrn Dr. Richard Hausmann bedanken, Leiter des Geschäftsgebietes Computertomographie der Siemens Medical Solutions, Forchheim.

Für das „Leben“ der Prozesskette „Prototyping“ danke ich den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Produktionstechnologie und Produktentwicklung. Herrn Olaf Assmann möchte ich besonders für die CAM- Datenverarbeitung danken.

Den Mitarbeitern des Universitätsklinikums Essen aus den Bereichen Röntgendiagnostik und Unfallchirurgie danke ich für die pragmatische Durchsetzung dieser Arbeit.

Für die große Unterstützung und Geduld während der Erstellung dieser Arbeit sowie deren Korrektur möchte ich meiner Frau Tanja ganz besonders danken.

Meinen Eltern danke ich für die kontinuierliche Unterstützung und Förderung, durch die mein beruflicher Werdegang erst ermöglicht wurde.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	V
1 Einleitung	1
2 Problemstellung, Analyse und Prinziplösung	3
2.1 Problemstellung und Zielsetzung	3
2.2 Prinzipielles Konzept „Auflagesystem“	5
2.3 Stand der Medizintechnik	7
2.3.1 Krankentransport- und Lagerungsmittel	7
2.3.2 Bekannte technische Hilfsmittel	9
2.4 Röntgenstrahlung und bildgebende Diagnoseverfahren	11
2.5 Integration des Auflagesystems in medizinische Prozessketten	18
2.5.1 Prozesskette „Notfall“	18
2.5.2 Prozesskette „Intensivmedizinische Diagnose“	22
2.5.3 Manuelle Umlagerungsvarianten	26
2.6 Funktionale Anforderungen	29
2.7 Ergonomie- Anforderungen	31
2.7.1 Allgemeine Anforderungen.....	32
2.7.2 Daten und Maßanforderungen	34
2.8 Technologische Anforderungen.....	36
2.9 Werkstoffauswahl	40
2.10 Wirtschaftliche Aspekte	42

3 Grundlagen der Kunststoff- Verbund- Systeme	47
3.1 Werkstoffe	47
3.1.1 Füllstoffe	48
3.1.1.1 Faserwerkstoffe	48
3.1.1.2 Faserhalbzeuge	53
3.1.1.3 Ungerichtete flächige Halbzeuge	54
3.1.1.4 Gerichtete flächige Halbzeuge	55
3.1.2 Polymere Matrixsysteme	57
3.1.2.1 Duromere Matrixsysteme	58
3.1.2.2 Thermoplastische Matrixsysteme	60
3.1.3 Vorimprägnierte Halbzeuge	61
3.1.4 Preformlinge	64
3.2 Mikromechanik	64
3.3 Laminataufbau	65
3.4 Fertigungsverfahren	67
3.4.1 Hand- und teilmechanische Nassverfahren	67
3.4.2 Diskontinuierliche Verfahren	72
3.4.3 Kontinuierliche Verfahren	76
3.5 Berechnungsverfahren nach VDI- Richtlinie 2014	77
3.5.1 Berechnung der Einzelschicht	77
3.5.2 Berechnungen des Schichtverbundes	77
3.5.2.1 Netztheorie	77
3.5.2.2 Klassische Laminattheorie	80
3.6 Numerische Berechnungsmethoden / FEM	81
4 Konzeption und Gestaltung	83
4.1 Lösungsansätze	83
4.1.1 Kräfte beim Umlagerungsvorgang	83
4.1.2 Berechnung eines Sandwichbauteils	85
4.1.3 Vergleich und Berechnung von dünnen Profilen	90
4.1.4 Werkstoffkosten für CFK- Lamine	96
4.1.5 Konstruktive Teillösungen des Liegenelementes	100

4.2	Prinziplösung und Gestaltung der Komponenten	102
4.2.1	Befestigungsmechanismen	102
4.2.1.1	Befestigungsprofilvarianten.....	105
4.2.1.2	Haltervarianten	106
4.2.1.3	Schutz der Befestigungsprofile des Liegenelementes	110
4.2.2	Griffe	111
4.2.3	Liegenelemente CCB1 bis CCB3.....	114
4.2.4	Grifflagerungen bei CCB2 und CCB3	118
4.2.5	Kopfhalter und Arretierung bei CCB2 und CCB3	119
4.2.6	Tischaufsatz.....	121
4.2.7	Armauflage.....	122
4.2.8	Polsterauflage	125
5	Auslegung der Komponenten	127
5.1	Vorauslegung der Liegenelemente.....	127
5.1.1	Belastungen und notwendige Schichtstärken CCB 1	127
5.1.2	Verstärkung des Mittelteils des CCB1	137
5.1.3	Belastungen und Schichtstärken des CCB2 und CCB3.....	139
5.2	Numerische Simulation mit der FEM.....	141
5.2.1	Liegenelement des CCB3	141
5.2.2	Arretierung des Tischaufsatzes.....	143
5.2.3	Kopfhaltereinschub	146
5.2.4	Kopfhalter.....	149
5.2.5	Griffe und Griffbefestigung	150
5.2.6	Armauflagen.....	156
6	Fertigungskonzepte	159
6.1	Prototypenfertigung	159
6.1.1	CCB1	159
6.1.2	CCB2	163
6.1.3	CCB3	165
6.2	Serienfertigung	166
6.2.1	Liegenelemente	167
6.2.2	Haltegriffe.....	171

7 Prüfung	173
7.1 Klinische Prüfung	173
7.2 Mechanische Prüfverfahren.....	177
7.2.1 Statische Prüfverfahren in Anlehnung an DIN EN 1865.....	177
7.2.1.1 Biegeprüfung des Liegenelementes	177
7.2.1.2 Torsionsprüfung des Liegenelementes	178
7.2.1.3 Verformungsprüfung des Liegenelementes	179
7.2.1.4 Zugprüfung des Griffes	180
7.2.2 Statische Prüfung der Anbauteile.....	181
7.2.3 Dynamische Biegeprüfung des Liegenelementes	183
7.2.4 Dynamische Zugprüfung des Griffes.....	184
8 Zusammenfassung und Ausblick	187
9 Literaturverzeichnis	191
10 Anhang	197
Abb. A1-A5: Röntgenaufnahmen	
Abb. A6: Darstellung CCB3	
Tab. A1- A3: Eigenschaften von FKV- Fertigungsverfahren	

Nomenklatur

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

<u>Kurzwort</u>	<u>Bedeutung</u>
-----------------	------------------

ABS	<u>A</u> crylnitril/ <u>B</u> utadien/ <u>S</u> tyrol
BMC	<u>B</u> ulk <u>M</u> oulding <u>C</u> ompound
CCB	<u>C</u> ritical <u>C</u> are <u>B</u> oard
CF	<u>C</u> arbon <u>f</u> aser
CFK	<u>C</u> arbonfaserverstärkter/Kohlenstofffaserverstärkter <u>K</u> unststoff
CFKV	<u>C</u> arbonfaserverstärktes <u>K</u> unststoff- <u>V</u> erbund- System
CLT	<u>C</u> lassical <u>L</u> amination <u>T</u> heory
CT	<u>C</u> omputer- <u>T</u> omographie
DGT	<u>D</u> auer- <u>G</u> ebrauchs- <u>T</u> emperatur
EG	<u>E</u> lementgröße
EP	<u>E</u> poxidharz
FEM	<u>F</u> inite- <u>E</u> lemente- <u>M</u> ethode
FKV	<u>F</u> aser- <u>K</u> unststoff- <u>V</u> erbund
FVG	<u>F</u> aser- <u>V</u> olumen- <u>G</u> ehalt
GFK	<u>G</u> lasfaserverstärkter <u>K</u> unststoff
GMT	<u>G</u> las <u>m</u> attenverstärkter <u>T</u> hermoplast
GB	<u>G</u> rund <u>b</u> eleugung
HE	<u>H</u> igh <u>E</u> nergy, hohes Arbeitsaufnahmevermögen
HM	<u>H</u> igh <u>M</u> odulus, hoher E- Modul
HMS	<u>H</u> igh <u>M</u> odulus, <u>H</u> igh <u>S</u> trength, hochsteif und hochfest
HT	<u>H</u> igh <u>T</u> ensile, hochfest
IM	<u>I</u> nter <u>m</u> ediate
KTW	<u>K</u> ranken <u>t</u> ransport <u>w</u> agen
KVS	<u>K</u> unststoff- <u>V</u> erbund- <u>S</u> ystem

AbkürzungenKurzwort Bedeutung

LVT	<u>L</u> angfas <u>e</u> r <u>v</u> er <u>s</u> tär <u>k</u> t <u>e</u> <u>T</u> hermo <u>p</u> laste
MRT	<u>M</u> agnet- <u>R</u> esonanz- <u>T</u> omographie
NC	<u>N</u> umeric <u>C</u> ontrol
OP	<u>O</u> perationssaal
PA	<u>P</u> oly <u>a</u> mid
PAI	<u>P</u> oly <u>a</u> mid <u>i</u> mid
PAN	<u>P</u> oly <u>a</u> cryl <u>n</u> itril
PC	<u>P</u> oly <u>c</u> arbonat
PEEK	<u>P</u> oly <u>e</u> ther <u>e</u> ther <u>k</u> eton
PEI	<u>P</u> oly <u>e</u> ther <u>i</u> mid
PES	<u>P</u> oly <u>e</u> ther <u>s</u> ulfon
PI	<u>P</u> oly <u>i</u> mid
POM	<u>P</u> oly <u>o</u> xym <u>e</u> thylen (Polyacetal)
PP	<u>P</u> oly <u>p</u> ropylen
PTFE	<u>P</u> olyt <u>e</u> t <u>r</u> afluore <u>t</u> hylen
PUR	<u>P</u> oly <u>u</u> rethan
RIM	<u>R</u> esin <u>I</u> njection <u>M</u> oulding
RTM	<u>R</u> esin <u>T</u> ransfer <u>M</u> oulding
SAN	<u>S</u> tyrol/ <u>A</u> cryl <u>n</u> itril
SFK	<u>S</u> ynthesefaser- verstärkter <u>K</u> unststoff
SMC	<u>S</u> heet <u>M</u> oulding <u>C</u> ompound
SR	<u>S</u> chockraum
UD	<u>U</u> nidirektional
UP	<u>U</u> ngesättigtes <u>P</u> olyesterharz
UV	<u>U</u> ltraviolett
VE	<u>V</u> inylesterharz
ZFB	<u>Z</u> wischenfaser <u>b</u> ru <u>c</u> h

Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen

<u>Formelzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
A	[m ²]	Fläche
b	[mm]	Breite
c	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit
d	[m]	Dicke
E	[N/mm ²]	Elastizitäts- Modul
F	[N]	Kraft
G	[N/mm ²]	Schubmodul
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung = 9,81 m/s ²
H	[mm]	Bauteilhöhe
h	[Ws ²]	Planksches Wirkungsquantum
I	[J/m ² s]	Strahlungsintensität
I	[mm ⁴]	Flächenträgheitsmoment
LF	[-]	Lastfaktor
l	[m]	Länge
M	[Nm]	Biegemoment
m	[kg]	Masse
n	[N/mm]	Schnittkraftfluss
n	[-]	Laufvariable
p	[bar]	Druck
R	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
S	[-]	Sicherheitsfaktor
s	[mm]	Wandstärke
t	[s]	Zeit
T	[mm]	Bauteiltiefe
tex	[-]	Rovingstärke, entspricht g/km (DIN 60905-1)
W	[J]	Energie
w	[mm]	Durchsenkung
z	[mm]	Abstand von neutraler Faser

Verzeichnis der griechischen Formelzeichen

<u>Formelzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
α	[°]	Winkel
α_T	[K ⁻¹]	Wärmeausdehnungskoeffizient
β	[°]	Winkel
λ	[m]	Wellenlänge
μ	[-]	Absorptionskoeffizient
μ_H	[-]	Haftreibungskoeffizient
ν	[1/s]	Frequenz
ρ	[g/cm ³]	Dichte
σ	[N/mm ²]	Spannung

Verzeichnis der tiefergestellten Indizes

<u>Formelzeichen</u>	<u>Bedeutung</u>
\perp	Senkrecht zum Faserverlauf
II	Parallel zum Faserverlauf
0	Anfangswert
1,2,3	Lokale Koordinatenrichtung oder Laufvariable
I, II	Koordinatenrichtung Hauptspannungen I und II
B	Bruchwert
b	Biegung
d	Druckbelastung
Druck	Druckwert
F, f	Richtung Faserverlauf
H	Haftung
krit	Kritischer Wert
längs	Richtung der Längsachse des CCB

Verzeichnis der tiefergestellten IndizesFormelzeichen Bedeutung

m	Mittlerer Wert
max	Maximalwert
oben	Oberseite
quer	Senkrecht zur Richtung der Längsachse des CCB
R	Reibung
T	Temperatur
unten	Unterseite
x, y, z	Koordinatenrichtung
z	Zugbelastung
Zug	Zugwert
zul	Zulässiger Wert
vorh	Vorhandener Wert

1 Einleitung

Schwer verletzte oder immobile Patienten, die nicht in der Lage sind sich selbstständig zu bewegen, müssen im Laufe der stationären Behandlungskette sehr häufig durch das medizinische Personal transportiert und umgebettet werden. Dabei entstehen durch den Zeitverlust und die auf den Patientenkörper einwirkenden mechanischen Belastungen bei der Umbettung erhebliche Risiken, insbesondere im Notfall. Hieraus ergibt sich die permanente Aufgabe, die Prozesskette „Patiententransport und -umbettung“ zu verkürzen bzw. zu verbessern.

Eine Lösung kann durch ein System erreicht werden, durch das der Patient vom Beginn der Prozesskette an immobilisiert, fixiert, transportiert, versorgt und behandelt werden kann, wobei alle bestehenden geometrischen und funktionalen Gegebenheiten der Behandlungskette zu berücksichtigen sind. Insbesondere in bildgebenden Diagnoseverfahren, wie der Computer- oder Magnet- Resonanz- Tomographie, muss ein geringer Einfluss dieses Systems auf deren Ergebnisse gewährleistet sein.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Patientenauflegesystems und beinhaltet die Analyse der Behandlungskette, die Konkretisierung der Systemanforderungen und die darauf aufbauende Konzipierung, Berechnung, Realisierung und Prüfung. Die entwickelten Konzepte berücksichtigen dabei speziell die besonderen Eigenschaften der verwendeten Kunststoff- Verbund- System- Werkstoffe.

Die Arbeit ist im Rahmen eines Industrieprojektes in Zusammenarbeit mit der Röntgendiagnostik und Unfallchirurgie des Klinikums Essen entstanden. Die Ergebnisse sind teilweise unter der Nummer DE 10121130 C2 patentrechtlich geschützt.

2 Problemstellung, Analyse und Prinziplösung

Das Kapitel präsentiert nach der Vorstellung der gegebenen Problemstellung und Zielsetzung das prinzipielle Lösungskonzept. Nach Darstellung der Diagnoseverfahren werden ausgewählte medizinische Prozessketten vorgestellt und das prinzipielle Lösungskonzept in diese integriert. Darauf aufbauend werden die notwendigen Anforderungen an das prinzipielle Konzept abgeleitet bzw. weiter verfeinert. Anschließend erfolgt die Werkstoffauswahl und eine Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte.

2.1 Problemstellung und Zielsetzung

Innerhalb medizinischer Prozessketten besteht stets die Aufgabe, Risiken für Patientinnen und Patienten¹ weiter zu minimieren und gleichzeitig die Ergonomie und Effektivität von Arbeitsabläufen zu verbessern. Ein Problem bei stationären medizinischen Prozessketten von Patienten, die immobil sind oder sich nicht selbstständig bewegen dürfen, stellen dabei die häufigen Umlagerungs- und Transportvorgänge dar. Die Patienten und das medizinische Personal sind in diesen Fällen einer hohen körperlichen Belastung ausgesetzt. Außerdem entsteht durch den Umlagerungsvorgang immer dann ein Zeitverlust, wenn medizinische Versorgungsgeräte, wie sie bei Intensiv- oder Notfallpatienten häufig notwendig sind, mit umgesetzt werden müssen.

Die Umbettung erfolgt in der Regel mit Hilfe eines flexiblen Tragetuches oder Lakens, das zunächst unter den Patienten geschoben wird. Auf diesem Tuch liegend wird der Patient von einer Auflagefläche zur anderen herübergezogen bzw. gehoben, wobei das medizinische Personal, das aus zwei bis vier Personen

¹ Im folgenden wird zur Vereinfachung nur die maskuline Form verwendet.

besteht, das Tuch an den Längsseiten hält, **Abb. 2-1**. Nach dem Umlagerungsvorgang werden die evtl. notwendigen Versorgungssysteme umgesetzt.

Die täglichen Umlagerungsvorgänge bedeuten für das medizinische Personal eine hohe körperliche Belastung, da der Patient kurzzeitig gehalten werden muss. Erschwerend kommt hinzu, dass die Ergonomie des Umlagerungsvorganges durch die vornübergebeugte Haltung des Personals während des Herüberziehens besonders ungünstig ist, **Abb. 2-2**. Die Wirbelsäule wird hierdurch stark belastet. Weiterhin muss das Umsetzen für den Patienten sanft erfolgen, wodurch sich die Haltezeit verlängert.

Für den Patienten entsteht durch die Umbettung eine hohe mechanische Belastung, da das Transfertuch flexibel ist und damit eine Verformung des Körpers erlaubt, die sich negativ auf die bereits vorhandenen aber u. U. bei Notfallpatienten noch nicht exakt diagnostizierten Verletzungen auswirken kann, **Abb. 2-1** und **Abb. 2-2**. Wird der Patient nicht vollständig angehoben, sondern zum Teil gezogen, können sich die Seitenkanten der verwendeten Auflagerungselemente durch das Tuch durchdrücken und so zusätzlichen punktuellen Druck ausüben.



Abb. 2-1: Umlagerungsvorgang im Schockraum mit einem Rettungstuch

Während des Umlagerungsvorganges ist das Diagnosegerät zwar belegt, es bleibt aber ungenutzt. Somit spielt der Zeitfaktor auch im Bereich der Kosten eine entscheidende Rolle. Die Planung der Belegungstermine und die damit im Zusammenhang stehende Kostenrechnung basieren wesentlich auf diesem Zeitfaktor. Eine Zeitreduktion in diesem Bereich führt somit entweder zu Kosteneinsparungen oder zur Erhöhung der möglichen Patientenzahl pro Tag.



Abb. 2-2: Umlagerungsvorgang für eine Untersuchung mit dem CT

2.2 Prinzipielles Konzept „Auflagesystem“

Die Problemstellung hat gezeigt, dass besonders bei immobilen Patienten, die intensiv versorgt werden müssen, die Umlagerung zeitaufwendig und belastend ist. Eine Möglichkeit, die auf den Patienten einwirkenden Belastungen innerhalb der Behandlungskette für Notfallpatienten bzw. der Diagnose bei Intensivpatienten zu verringern und Zeit einzusparen, besteht in der Verwendung eines dünnen und steifen Liegenelementes, auf das der Patient von Beginn der Prozesskette an gelegt und befestigt wird. An diesem Liegenelement werden alle für den Patienten notwendigen Versorgungssysteme direkt oder indirekt befestigt. Indirekt erfolgt dies mit Hilfe eines im Fußbereich an dem Liegenelement befestigten Tisches, der die Systeme trägt. Patient, Liegenelement und Versorgungssysteme bilden somit eine geschlossene Einheit, **Abb. 2-3**.

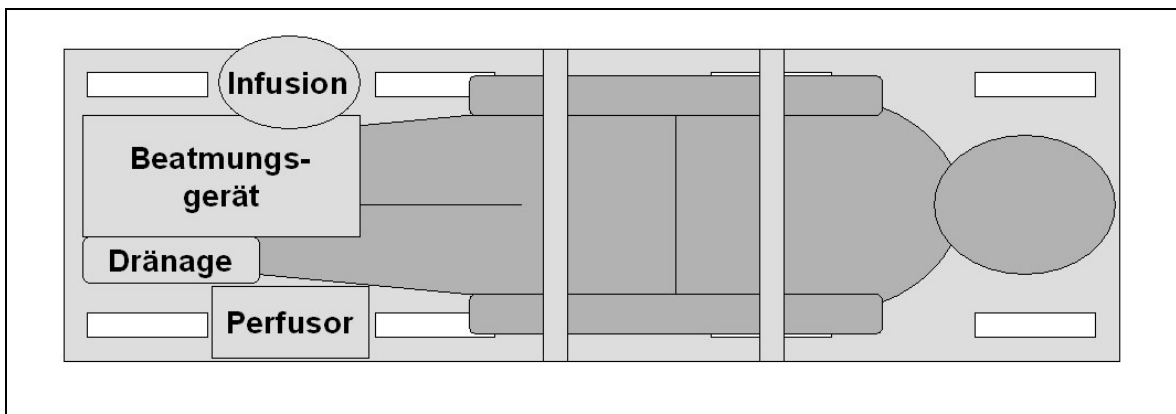


Abb. 2-3: Prinzipielles Konzept des Patientenauflegesystems

Das Patientenauflegesystem wird im Folgenden als *Critical Care Board* (CCB) bezeichnet.

Für alle Prozessschritte wird stets die gesamte Einheit verlagert. Dadurch, dass das Umsetzen von Zusatzteilen nun sehr schnell durchgeführt werden kann, verkürzt sich die Vor- und Nachbereitungszeit z.B. innerhalb des CT- Bereiches erheblich, **Abb. 2-4**. Idealerweise kann auch der Umbettungsvorgang des Patienten beschleunigt werden. Die Zeitdauer des Aufnahme- Vorganges des CT- Gerätes wird durch den Einsatz des CCB nicht verändert.

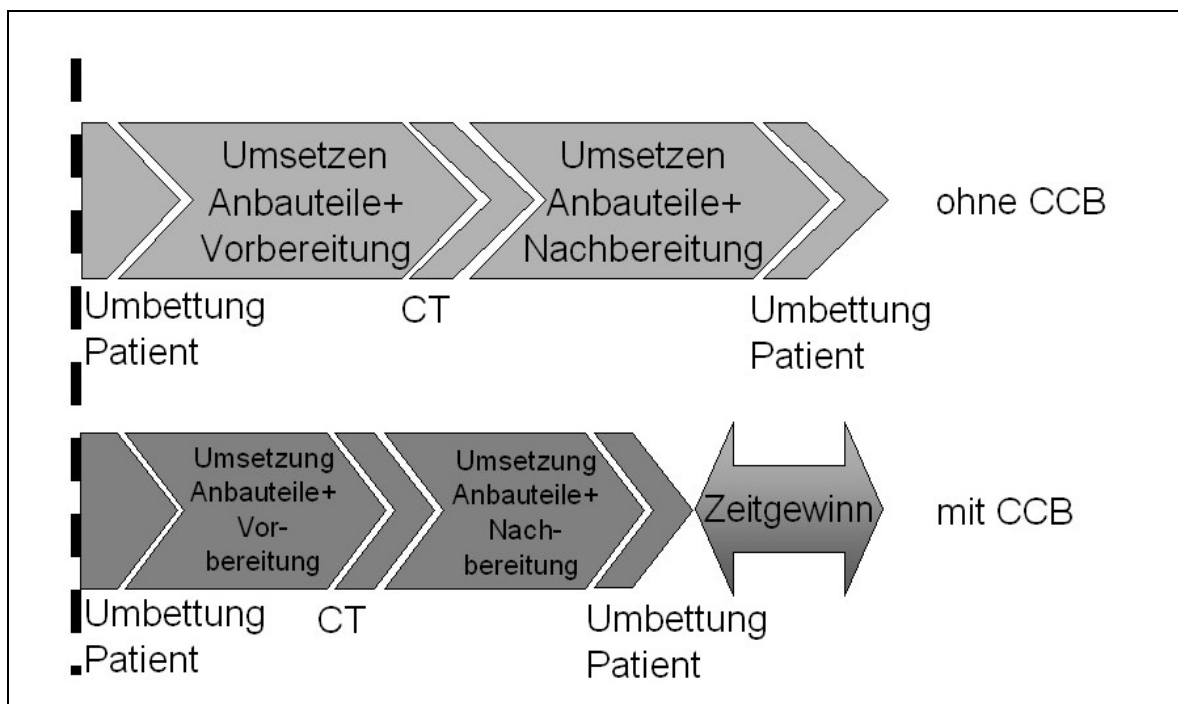


Abb. 2-4: Zeiten der CT- Diagnose ohne und mit CCB (qualitativ)

Außer dem als Beispiel angeführten Bereich der Diagnose mit dem CT- Gerät gibt es eine Vielzahl weiterer stationärer Prozessschritte, die im Kap. 2.4 beschrieben sind.

Die Abb. 2-4 zeigt auch, dass der eigentliche Diagnosevorgang nur einen geringen Teil der gesamten Verweilzeit eines Intensiv- oder Notfallpatienten darstellt (vgl. **Abb. 7-2**).

Bei mobilen Patienten ergeben sich grundsätzlich andere Zeitanteile. Diese sind in dieser Arbeit aber nicht relevant, da für diese Patienten das Patientenauflegesystem nicht zur Anwendung kommt.

2.3 Stand der Medizintechnik

Für das entwickelte prinzipielle Konzept muss geprüft werden, ob durch die Kombination von Produkten des verfügbaren Standes der Technik bereits eine Lösung gefunden werden kann. Deshalb ist die Darstellung der möglichen Patientenlagerungsmittel unbedingt notwendig. Gleichzeitig erfolgt neben diesen standardisierten Elementen eine Vorstellung weiterer bekannter technischer Hilfsmittel, die den Umlagerungsvorgang erleichtern können.

2.3.1 Krankentransport- und Lagerungsmittel

Für den medizinischen Transport von Kranken außerhalb des Krankenhauses werden eine Reihe von Fortbewegungsmitteln eingesetzt, in denen wiederum unterschiedliche Lagerungssysteme verwendet werden. Diese werden im Folgenden kurz aufgezeigt.

Für Krankentransportwagen wurde zur Vereinheitlichung die DIN EN 1865 [DIN99] entwickelt. Sie beschreibt die möglichen Lagerungsmittel:

- Haupttrage, Stuhltrage, Schaufeltrage,
- Vakuummatratze, Tragetuch,
- Tragematratze und langes Wirbelsäulenbrett.

Außer diesen Mitteln sind weiterhin die Korbtrage und das kurze Wirbelsäulenbrett im Bereich der Rettung bekannt [FER99]. Der innerklinische Transport erfolgt mit Patiententransportern oder Rollbetten. Innerhalb der Behandlungs- und Diagnosebereiche sind in der Regel separate, herstellerabhängige Lagerungsmöglichkeiten vorhanden.

Für das vorgestellte prinzipielle Konzept sind alle Systeme ungeeignet, die das feste Anbringen von Systemteilen nicht ermöglichen bzw. keine ausreichende Eigensteifigkeit aufweisen. Daher scheiden die Vakuummatratze und das Tragetuch generell aus. Haupt- und Stuhltragen sind aufgrund ihrer konstruktiven Ausführungen mit Querverstrebungen für die Röntgendiagnose ungeeignet. Die Schaufeltrage besteht aus zwei geteilten Längshälften, die in der Mitte stets eine Trennfuge oder einen Trennspace aufweist. Beim konventionellen Röntgen sind diese Spalte direkt im wichtigen Bereich der Wirbelsäule auf dem Röntgenbild zu sehen. Auch dieses Mittel ist deshalb ungeeignet. Die beiden verbleibenden Systeme sind das lange Wirbelsäulenbrett und die Tragematratze, die nun in ihren Anforderungen nach [DIN99] kurz vorgestellt werden, **Abb. 2-5**.

Eigenschaft	Tragematratze	langes Wirbelsäulenbrett
Länge	1900 - 1970 mm	1830 -1980 mm
Breite	≤ 500 mm	400 - 500 mm
Höhe	≤ 100 mm	< 70 mm
Gewicht	≤ 10 kg ($\triangleq 100$ N)	< 8 kg ($\triangleq 80$ N)
Griffe	4 je Längsseite	3 Griffe längsseitig, 2 Griffe stirnseitig
Tragkraft	> 150 kg ($\triangleq 1500$ N)	> 150 kg ($\triangleq 1500$ N)
Flexibilität	Form kann sich an Kontur der Haupttrage anpassen	möglichst steif
Steifigkeit	Transport durch zwei Personen an Längsseite möglich	Steifigkeit entsprechend Prüfverfahren
Rückhaltesystem	Entfällt	3 Rückhaltesysteme mit Schnellverschluss
Röntgenstrahlen-durchlässigkeit	Ja	Ja

Abb. 2-5: Eigenschaften von Krankentransportmitteln [DIN99]

Die Tragematratze ist für das Anbringen von Modulteilern aufgrund der hohen Flexibilität nur sehr bedingt geeignet. Weiterhin sind für Rückhaltesysteme keine Befestigungspunkte vorgesehen.

Die zulässige Gesamthöhe der Tragematratze von 100 mm widerspricht der im prinzipiellen Konzept geforderten möglichst geringen Dicke. Diese wird in Kap. 2.6 mit 50 mm aufgrund der geometrischen Gegebenheiten der CT-Geräte im Bereich der Liegefläche festgelegt.

Das lange Wirbelsäulenbrett ist als einziges Mittel für den Anwendungsfall bedingt geeignet, da es für Röntgenstrahlen durchlässig ist und die Abmessungen für Länge und Breite innerhalb der Grenzwerte des Anforderungskataloges liegen. Die Röntgenstrahlendurchlässigkeit muss allerdings so hoch sein, dass auch volle Röntgenkompatibilität gewährleistet ist. Für die hier vorliegende Problemstellung ist die maximal zulässige Höhe von 70 mm ungeeignet.

Die Zusammenstellung der möglichen Transportmittel zeigt, dass die Lösung der dargestellten Problemstellung nicht mit gegebenen Mitteln erreicht wird. Einzig das lange Wirbelsäulenbrett kann eingeschränkt als Grundlage dienen, um eine Lösung zu entwickeln, die allen in Kap. 2.6 bis 2.8 beschriebenen Anforderungen gerecht wird.

2.3.2 Bekannte technische Hilfsmittel

Es ist bekannt, dass eine Verbesserung des Umlagerungsvorganges durch die Verwendung eines reibungsarmen Rutsch- oder Rollbrettes erreicht wird. Das Transferbrett befindet sich während des Umlagerungsvorganges unter dem Transfertuch und überbrückt die Lücke zwischen den beiden Auflagerungsmitteln. Das beteiligte Personal muss weniger Kraft für das Anheben des Patienten aufwenden, da der Patient teilweise über das Transferbrett gleitend hinübergezogen werden kann. Nachteilig wirkt sich hier aus, dass die Breite und Länge des Transferbrettes begrenzt ist und daher nur eine bestimmte Lücke überbrückt werden kann. Weiterhin gestaltet sich die Positionierung des Brettes zu Beginn und die Entnahme nach der Umlagerung schwierig.

Es ist weiterhin bekannt, dass der Umlagerungsvorgang durch die Verwendung eines Umbett- Transporters, der eine seitlich ausfahrbare und höhenverstellbare Auflageplatte besitzt, für das Personal erleichtert wird [MAQ02]. Der Transporter wird dafür zunächst neben die Längsseite der Patientenaufgabe gefahren. Daraufhin wird die Auflageplatte seitlich ausgefahren, bis sie sich unter dem Patienten befindet. Während des Ausfahrens muss der Patient dafür auf einer Seite leicht angehoben werden. Den Auflagerungsvorgang unterstützt ein Förderband, welches um die Längsachse der Auflageplatte rotiert. Befindet sich der Patient auf der Auflageplatte, wird diese angehoben und wieder zum Transporter eingefahren. Nach dem Transport erfolgt der Umlagerungsvorgang durch Ausfahren der Auflageplatte mit dem Patienten über dem neuen Lagerungsmittel, Absenken der Auflagerungsplatte, Ausfordern des Patienten durch Drehung des Förderbandes um die Auflageplatte und erneutes Einfahren der Auflageplatte zum Transporter. Der Umlagerungsvorgang geschieht dadurch mit sehr geringem manuellen Kraftaufwand. Damit das System während des Ausfahrens nicht umfallen kann, ist es notwendig, dass ein ausreichendes Gegengewicht vorhanden ist oder das fahrbare Untergestell des Umbetter- Transporters eine U- Form aufweist, das alle Auflagerungsbereiche unterfahren kann. Dadurch ist das System schwer in der Handhabung oder es sind u. U. Modifikationen der bestehenden Technik notwendig, um den Platz für ein Einfahren bzw. Unterfahren zu ermöglichen. Dies ist häufig nicht realisierbar. Das Ausfahren und Einfahren der Auflageplatte unter dem Patienten erfordert weiterhin zwangsweise ein Anheben des Patienten, was eine mechanische Belastung für Patient und Personal darstellt. Der Umlagerungsvorgang ist außerdem sehr zeitintensiv, da die Positionierung in Breite und Höhe und das Fördern mit begrenzter Geschwindigkeit erfolgt. Für zeitkritische Vorgänge im Bereich der Notfallrettung ist dieses System deshalb nur begrenzt geeignet.

Eine weitere Möglichkeit der Umbettung stellen die Hebelifter dar. Diese bestehen im Wesentlichen aus einem Fahrgestell mit einstellbarem Kranarm. An diesem Arm befindet sich eine Seilwinde, über die der Patient mit Hilfe von Gurten angehoben und gesenkt werden kann. Dieses System ist für zeitkritische Vorgänge nicht geeignet.

2.4 Röntgenstrahlung und bildgebende Diagnoseverfahren

Da die Anforderungen sehr hoch sind, die durch die Verwendung der Diagnosegeräte entstehen, erfolgt eine Vorstellung der dazu notwendigen Grundlagen zunächst so weit, wie es für die Herausarbeitung der im Folgenden darauf aufbauenden Anforderungen relevant ist.

Für drei bildgebende Diagnoseverfahren ist ein Einfluss des Auflagesystems auf das Diagnoseergebnis zu erwarten:

- Im Bereich des Schockraumes wird das **konventionelle Röntgenverfahren** mit Filmaufnahme eingesetzt, um erste Aussagen über den Zustand der Knochen, insbesondere der Wirbelsäule, treffen zu können. Hierbei befinden sich der Patient, das Auflagesystem und der Schockraumtisch im Strahlengang.
- Ist die Erstversorgung gesichert, kann der Einsatz eines **Computer-Tomographen** erfolgen, durch den genauere Aussagen über die bestehenden Schädigungen möglich werden. Auch hier werden Röntgenstrahlen eingesetzt. Der Patient, das Auflagesystem und die fest installierte CT- Liege werden gleichzeitig durchstrahlt.
- Ein weiteres Diagnoseverfahren, das gegenwärtig für Notfallpatienten noch sehr selten verwendet wird, ist die **Magnet- Resonanz- Tomographie**, bei der sich Patient und Auflagesystem innerhalb starker und wechselnder Magnetfelder befinden.

Röntgenstrahlung

Da die volle Röntgenkompatibilität der entscheidende Faktor für das Auflagesystem ist, folgt nun eine genauere Darlegung der wichtigsten Begriffe im Bereich der Röntgenstrahlung.

Röntgenstrahlen bestehen aus elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen zwischen 10^{-5} und 10 nm [HES99, S. 7]. Wird die Strahlung als ein Strom von Röntgenquanten betrachtet, so kann die Energie bzw. Härte dieser Strahlung berechnet werden:

$$W = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} . \quad \text{Gl. 2-1}$$

Mit: W: Energie

h: Plancksches Wirkungsquantum = $6,62 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$

ν : Frequenz, c: Lichtgeschwindigkeit, λ : Wellenlänge

Die Intensität der Strahlung ergibt sich zu:

$$I = \frac{W}{A \cdot t} . \quad \text{Gl. 2-2}$$

Mit: I: Intensität

W: Härte der Strahlung

A: bestrahlte Fläche, t: Zeiteinheit

Beim Durchgang durch einen Körper wird die Strahlung teilweise von dem Werkstoff absorbiert. Bereiche mit Werkstoffen, die eine hohe Ordnungszahl und damit eine hohe Dichte aufweisen, absorbieren dabei im Allgemeinen stärker als Bereiche mit Werkstoffen niedriger Ordnungszahl. Das Lambert- Beersche Absorptionsgesetz gibt an, wie stark die Strahlung in Abhängigkeit der Absorptionskonstanten und Materialdicke absorbiert wird:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} . \quad \text{Gl. 2-3}$$

Mit: I: Endintensität, I_0 : Anfangsintensität

μ : Absorptionskoeffizient

d: Dicke des Probekörpers

Beim Durchgang durch das Material nimmt die Strahlungsintensität exponentiell mit zunehmender Dicke ab. Es ist dabei unerheblich, ob die Strahlung durch eine einzige massive Platte geschwächt wird oder durch mehrere dünne hintereinander gelegte Platten gleicher Gesamtdicke. Dieses Erkenntnis ist im Folgenden für den Einsatz von aufgeschäumten Kernwerkstoffen wichtig, die etwa zu 95 % aus gasgefüllten Bereichen bestehen.

Die Gl. 2-3 kann auch nach der Dicke aufgelöst werden. Sie ergibt dann beispielsweise, dass eine Absorption von 99,9 % durch eine Bleiplatte von 1 mm oder aber eine Wassersäule von 345 mm erreicht werden kann.

Der Absorptionskoeffizient ist stark abhängig von der Energie der Strahlung. Das liegt daran, dass die physikalische Grundlage für den Absorptionskoeffizienten auf drei Effekte, den Photoeffekt, den Comptoneffekt und die Paarbildung zurückzuführen ist, die einzeln für sich wiederum eine Funktion der Strahlungsenergie sind [HES99]. Die Absorption durch den Photoeffekt kann an Kanten bis zu fünfmal stärker sein, als sie es theoretisch sein dürfte [HES99, S. 13].

Konventionelles Röntgen

Bei Röntgenröhren, die zur medizinischen Diagnostik eingesetzt werden, kommen Hochspannungen zwischen ca. 25 kV bis ca. 150 kV zur Anwendung. Geringe Hochspannungen werden z.B. zur Mammographie verwendet. Für Aufnahmen von dicken und dichten Körperregionen sowie bei CT- Aufnahmen werden die größeren Hochspannungen benötigt [MWW03].

Dabei entsteht an der Anode ein elektromagnetisches Spektrum, welches über eine Blende an der Röntgenröhre in einer bestimmten Richtung austritt. Diese Strahlung durchläuft den zu untersuchenden Körperteil, wobei sie durch Knochen oder Weichteile unterschiedlich stark geschwächt wird. Anschließend trifft die Strahlung auf eine Platte, in deren Inneren sich ein spezieller Röntgenfilm befindet. Je höher die verbleibende Intensität der Strahlung ist, desto stärker wird der Film belichtet, d.h. geschwärzt. Im Bereich Schockraum bilden Röntgenröhre und Plattenhalter eine Einheit in Form eines Röntgenbogens, der an einer Verstelleinheit aufgehängt ist und so an beliebiger Stelle positioniert werden kann, während sich der Patient auf der Liege befindet und nicht bewegt wird. Standardmäßig wird die Liege also stets mit durchstrahlt, **Abb. 2-6**.

Die Röntgenbilder werden nach der Entwicklung in der Regel digitalisiert und stehen somit auch in Form von Pixelgrafiken zur Verfügung. Bereiche geringen Kontrasts können durch digitale Bildverarbeitung eventuell verbessert werden, die Möglichkeiten sind aber auf Grund der Höhe der Pixelauflösung und der Farbtiefe (Gesamtanzahl der Grauwerte) begrenzt.

Artefakte sind unerwünschte Stellen auf dem Röntgenbild, die als helle Bereiche sichtbar werden. Ein Artefakt entsteht beim konventionellen Röntgen immer dann, wenn außerhalb des zu untersuchenden Körperbereiches die Röntgenstrahlung

örtlich ungleichmäßig geschwächt wird, d.h. es muss nach dem Absorptionsgesetz im Strahlengang Bereiche geben, die eine andere Dicke oder Dichte aufweisen.

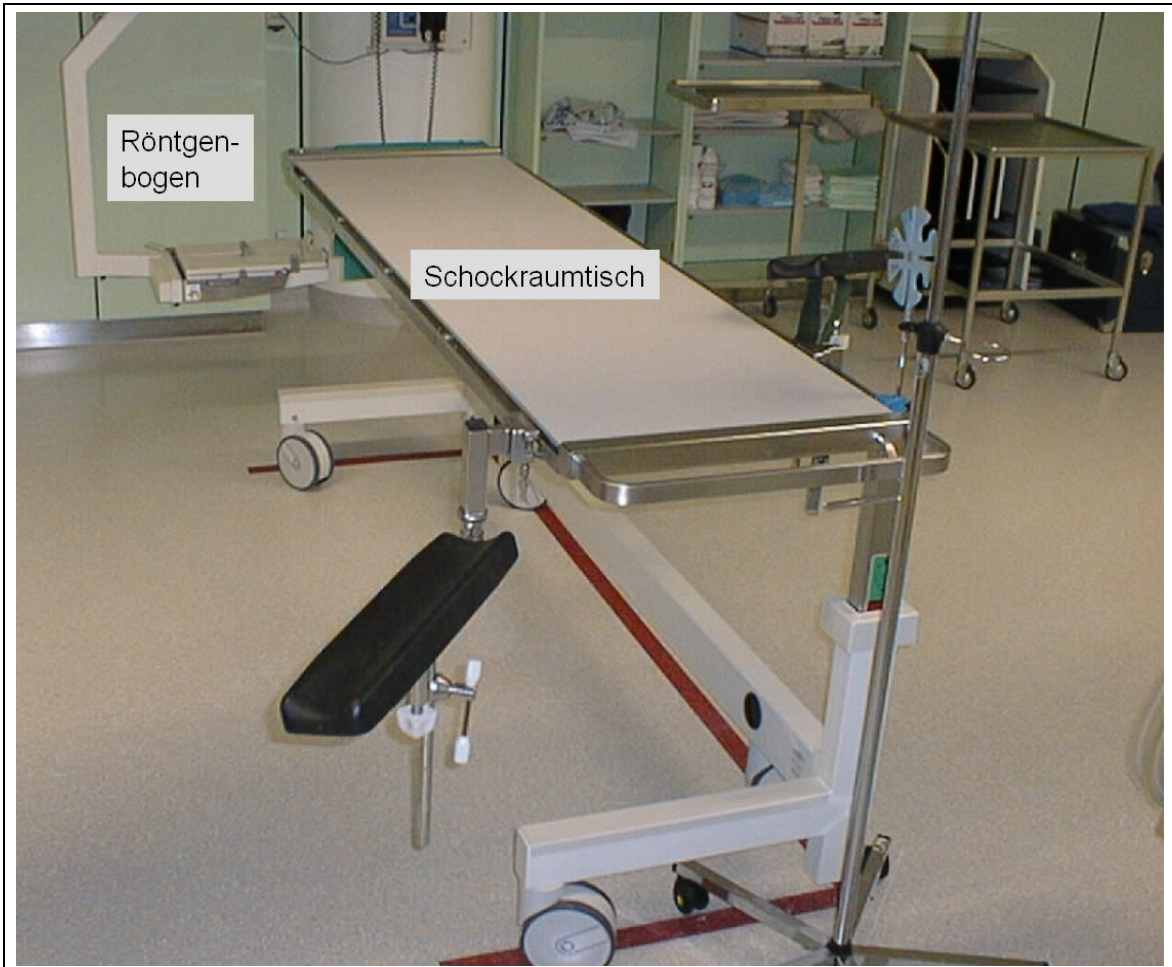


Abb. 2-6: Auflagetisch und Röntgenanlage im Schockraum des Universitäts- Klinikums Essen

In den hellen Bereichen kann die Aufnahme nicht mehr in ausreichend viele Graustufen eingeteilt werden, es gibt keinen Kontrast für die Diagnose. Artefakte erschweren die Diagnose erheblich, wenn sie in wichtigen Bereichen vorkommen, wie z.B. im Bereich der Wirbelsäule. Der behandelnde Arzt kann nicht mehr unterscheiden zwischen einem Artefakt durch körperfremde Einflüsse und dem Körper selber. Es besteht somit die Gefahr, dass geschädigte Bereiche innerhalb des Artefaktes übersehen werden.

Computer- Tomographie

Die Computer- Tomographie arbeitet ebenso wie das konventionelle Röntgen mit ionisierender elektromagnetischer Strahlung. Es wird allerdings nicht nur eine planare Röntgenaufnahme mit Hilfe eines Röntgenfilmes erstellt, sondern der Patient wird mehrfach von allen Seiten mit Hilfe eines um den Patienten drehenden Systems (Gantry²) bestehend aus Röntgenröhre und Detektorleisten aufgenommen, **Abb. 2-7**.

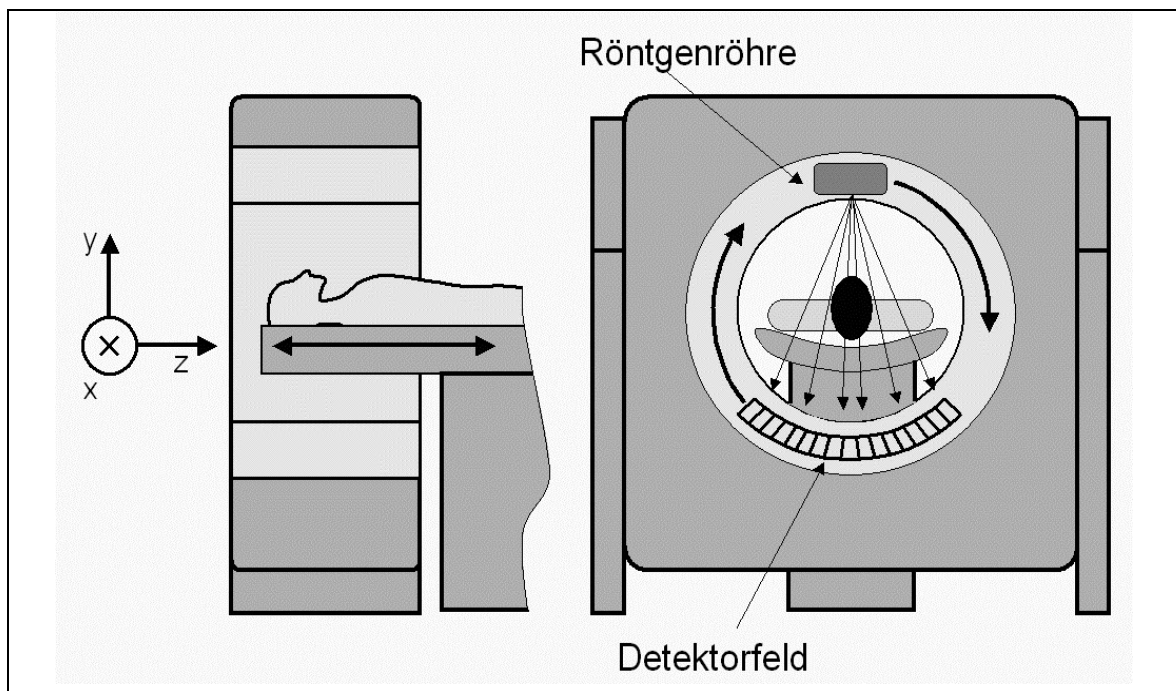


Abb. 2-7: Aufbau eines Computer- Tomographen (Transmissions- CT)

Dabei wird je Umdrehung nur ein schmaler Streifen des Körpers erfasst. Dieser Schichtbereich wird senkrecht zur Durchstrahlungsrichtung dann in x- und y- Richtung in kleine Volumenelemente geteilt, die die Auflösung des Systems darstellen und als Voxel (*volume element*) bezeichnet werden [STRA03]. Aus den gewonnenen Detektorinformationen wird für jedes Voxel des untersuchten Schichtbereiches ein Absorptionswert mit Hilfe eines Hochleistungscomputers berechnet. Die Darstellung kann dann als zweidimensionales Schnittbild erfolgen, wobei die Absorptionswerte der Voxel als Grauwerte der Pixel (*picture element*)

² Gantry, engl.: Das Gerüst

des Bildes dargestellt werden. Um einen bestimmten Breitenbereich des Körpers zu erfassen, müssen so viele Umdrehungen der Aufnahmeeinheit erfolgen, wie es sich aus dem Quotienten aus gewünschter Untersuchungsbreite zu Schichtdicke ergibt. Der Vorschub während der Aufnahmesequenz erfolgt durch die Verschiebung der CT-Liege in z- Richtung bezüglich der Gantry. Das bedeutet, dass die Liege, auf der sich der Patient befindet, immer mit durchstrahlt wird.

Bei der Computer- Tomographie kommt es durch alle sich im Strahlengang befindlichen Elemente zu einer Schwächung der Röntgenstrahlung. Da aber das Schnittbild aus allen Messungen einer Umdrehung berechnet wird, kann theoretisch innerhalb des berechneten Bereiches kein Artefakt entstehen. Bei der Durchstrahlung von scharfkantigen massiven Körpern zeigt sich allerdings, dass es zu *Streifenartefakten* kommen kann. Der massive (helle) Bereich einer Kante scheint sich dann in andere Bereiche in Form eines aufhellenden Schleiers weiter fortzusetzen. Dies liegt an der an Kanten höheren Absorption, die nicht immer vollständig heraus gerechnet werden kann. Sofern die Streifenartefakte weit genug vom eigentlichen untersuchten Bereich entfernt sind, entstehen dadurch nur geringe Beeinflussungen. Dennoch bedeuten Bereiche hoher Dichte außerhalb des zu untersuchenden Bereiches eine unnötige Schwächung der Strahlung, die die Qualität der Aufnahme nicht verbessert. Die verwendete Dosisleistung darf nicht wegen eines weiteren im Strahlengang befindlichen Elementes erhöht werden, da sonst eine zusätzliche Belastung bzw. ein Risiko für den Patienten entstände.

Magnet- Resonanz- Tomographie

Die Magnet- Resonanz- Tomographie arbeitet im Gegensatz zur Computer- Tomographie nicht mit ionisierender Strahlung. Sie verwendet mehrere Magnetfelder, die sich gegenseitig überlagern. Einen prinzipiellen Aufbau zeigt **Abb. 2-8**.

Das grundlegende Magnetfeld erzeugen die Feldspulen. Es hat eine Stärke von $\geq 1 \text{ T}$ (vgl.: Erdmagnetfeld $\sim 10^{-4}$ Tesla).

Um das Signal räumlich aufzulösen, erzeugen weitere Spulen sogenannte Gradientenfelder. Eine Bewegung des Patienten innerhalb des Gerätes ist somit nicht notwendig.

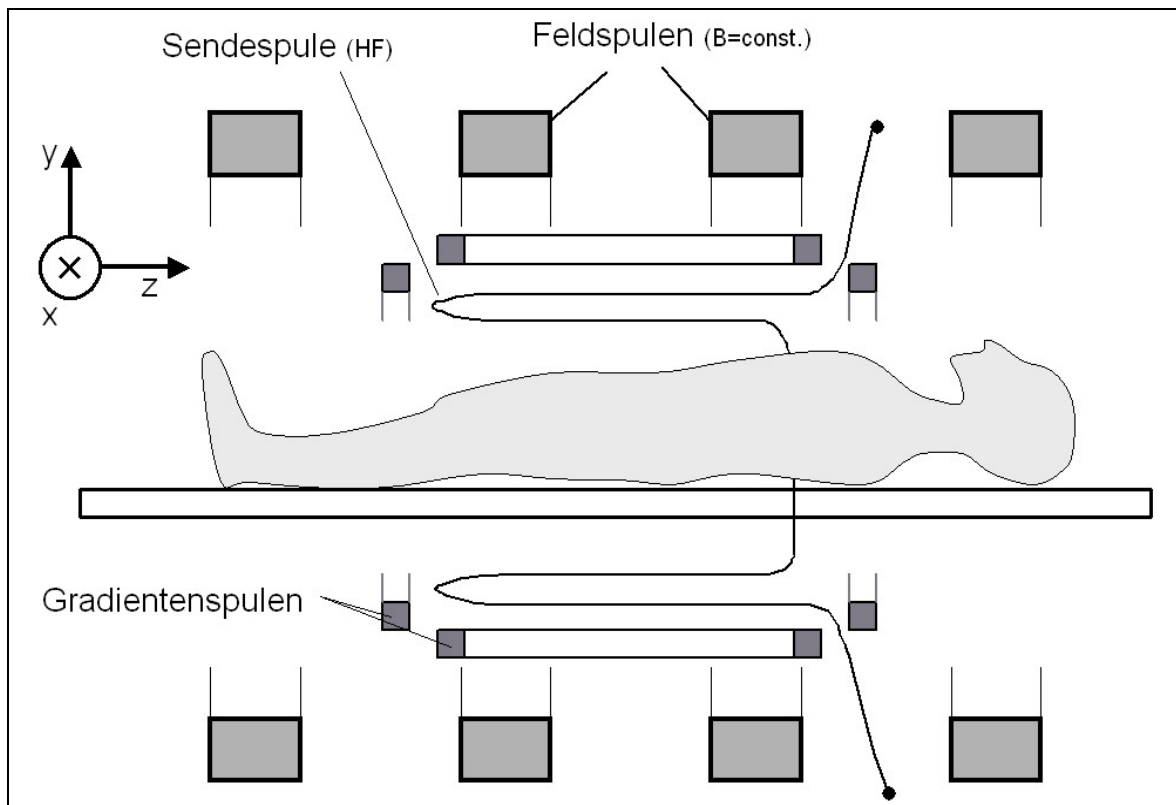


Abb. 2-8: Prinzipieller Messaufbau eines Magnet- Resonanz- Tomographen [PET00, S. 10]

Magnetische Teile erfahren durch das Grundmagnetfeld sehr große Kräfte. Diese Kräfte können nicht oder nicht ausreichend befestigte Teile stark beschleunigen, was eine große Gefahr darstellt. Magnetische Elemente müssen daher vermieden werden.

Die hochfrequenten Impulse können durch induzierte Wirbelströme bei ungünstiger Lage des Patienten unter Umständen so viel Wärmeenergie im Gewebe entwickeln, dass es zu inneren Verbrennungen kommt [PET00, S. 11].

Es muss sichergestellt sein, dass die wechselnden Magnetfelder keine Wärmeentwicklung durch Wirbelströme in der zu verwendenden Liege verursachen. Es darf kein elektrischer Stromfluss bzw. eine Hochspannung oder elektrische Aufladung entstehen.

2.5 Integration des Auftragesystems in medizinische Prozessketten

Für zwei wesentliche Behandlungsketten soll das in Kap. 2.2 beschriebene Konzept integriert werden, die Notfallrettung mit innerklinischer Diagnose und Behandlung und die bildgebende Diagnose von Intensivpatienten des Essener Universitätsklinikums. Aus diesem Grund erfolgt die genaue Darstellung dieser Behandlungsketten. Die Ableitung der daraus entstehenden Anforderungen ist in Kap. 2.6 bis 2.8 dargestellt.

2.5.1 Prozesskette „Notfall“

Vorstellung der Prozesskette

Die Prozessschritte der Notfallrettung vom Unfallort und den anschließenden stationären Behandlungen zeigt **Abb. 2-9**.

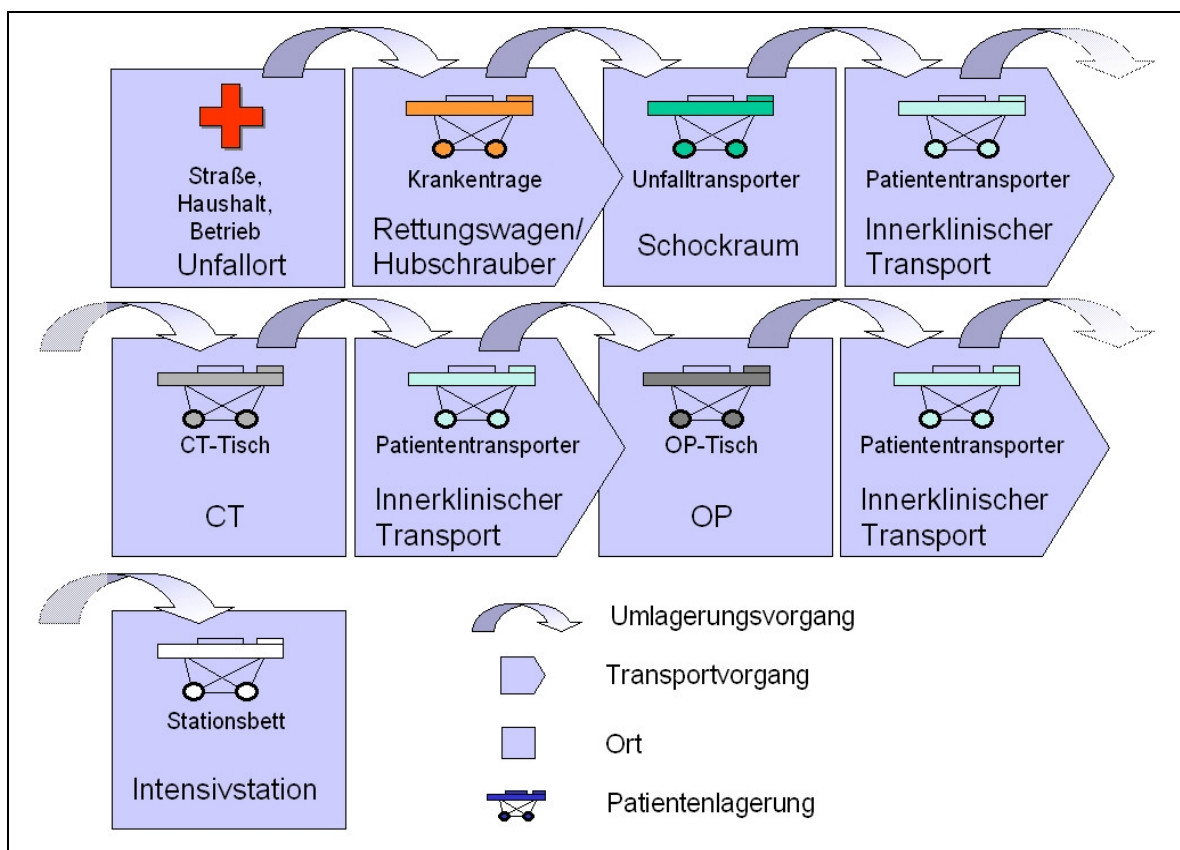


Abb. 2-9: Prozesskette „Notfallpatient“

Am Unfallort werden besonders schwer verletzte Patienten in Deutschland zur Immobilisation häufig auf eine Vakuummatratze gebettet. Wird diese Matratze nicht verwendet, kommt standardmäßig die Krankentrage zum Einsatz. Der Umlagerungsvorgang auf die Matratze oder die Krankentrage kann unter Zuhilfenahme von langen oder kurzen Wirbelsäulenbrettern bzw. Schaufeltragen erfolgen, vgl. Kap. 2.3.1. Der Transport vom Unfallort zum Krankenhaus wird mit einem Transportmittel, wie dem Krankenwagen oder dem Rettungshubschrauber, durchgeführt. Im Krankenhaus wird der Patient mit dem Rollen- Untergestell der Krankentrage in den Schockraum transportiert. Dort wird er auf den Schockraumtisch umgebettet. Das Rettungspersonal kann die Krankentrage und das Roll- Gestell wieder zum Transportmittel zurückbringen und für den nächsten Einsatz vorbereiten. Es erfolgt kein Austausch des Auflagerungsmittels. Nachdem die Versorgung und Diagnose im Schockraum abgeschlossen ist, wird der Patient auf einen Patiententransporter umgebettet und für die bildgebende Diagnose zum CT transportiert. Dort findet die Umlagerung auf die CT- Liege statt. Nach dem Aufnahmevergange wird der Patient wieder auf den Patiententransporter umgebettet und in den Operationssaal transportiert, wo eine erneute Umbettung auf den OP-Tisch stattfindet. Nach abgeschlossener Operation wird eine Rücklagerung auf das Transportmittel vorgenommen und der Patient zur Station gebracht. Es gibt maximal acht Umbettvorgänge.

Integration des Auflagesystems in die Prozesskette „Notfall“

Die Umbettung des Patienten auf das Liegenelement des Auflagesystems kann schon am Unfallort erfolgen. In diesem Bereich sind aber eine Vielzahl von Auflagerungsmitteln vorhanden, die sich im täglichen und harten Einsatz bewährt haben. In den USA werden lange Wirbelsäulenbretter von der Bergung bis in den Schockraumbereich eingesetzt. In Deutschland findet dagegen gegenwärtig die Vakuummatratze zur Immobilisierung Verwendung. Diese bietet während des Transportes einen höheren Schutz als das Patientenauflegesystem. Es ist daher im Einzelfall zu entscheiden, ob die Vakuummatratze, die Krankentrage oder das Patientenauflegesystem zur Anwendung kommen. Wird das Liegenelement des Auflagesystems nicht benutzt, kann es an der Position, an der sich auch die Vakuummatratze befindet, befestigt werden, da die Abmessungen von

Vakuummatratzen größer als die des Auflagesystems sind. Während der Benutzung z.B. im KTW befindet sich das Patientenauflegesystem auf der standardmäßig stets vorhandenen Krankentrage. Die Sicherung von Patient und Auflagesystem während des Transportes kann mit Hilfe des Drei- Punkt-Sicherungssystems der Krankentrage erreicht werden. In der Klinik wird das Auflagesystem mit Patient in den Schockraum gefahren und das Transportmittel, z.B. der KTW wird im Tausch mit einem neuen System inkl. elektrischer Geräte ausgerüstet.

Der Vorteil der Verwendung des Auflagesystems vom Unfallort an liegt darin, dass der Patient und das Auflagesystem während des Transportes innerhalb des Transportmittels zu einer Einheit aufgebaut werden können, die dann an die nächsten Stationen weitergegeben wird. Dies erspart den späteren zeitaufwändigen Aufbau im Schockraum. Nachteilig wirkt sich aber aus, dass ein hoher Verschleiß des Auflagesystems zu erwarten ist, die Immobilisierung schlechter als bei der Vakuummatratze ist und der Austausch von Auflagesystemen inkl. elektrischem Gerät zwischen allen Transportmitteln und Kliniken gewährleistet sein muss. Da die Ausrüstungen der einzelnen Transportmittel und Kliniken sehr unterschiedlich sind, ist dies nur sehr schwer realisierbar.

Es folgt eine Betrachtung der Integration des Auflagesystems in den Schockraumbereich. Hier findet die grundlegende Untersuchung und Stabilisierung des Patienten statt. Es wird vorausgesetzt, dass der Patient erst zu diesem Zeitpunkt auf das Auflagesystem umgebettet wird.

Das Auflagesystem befindet sich auf dem Schockraumtisch. Der Patient wird von der mobilen Krankentrage, die sich längs neben dem Schockraumtisch befindet, auf das System umgelagert (vgl. Abb. 2-1). Die Armauflage, die sich nicht an der Umlagerungsseite befindet, kann bereits montiert sein. Die zweite Armauflage kann nach der Umlagerung und Entfernung der mobilen Krankentrage, falls nötig, ebenfalls montiert werden. So wird das Abspreizen der Arme vom Körper ermöglicht, **Abb. 2-10**. Kurz vor Ende der Diagnose und Versorgung werden der Tischaufsatz mit den elektrischen Geräten, die Kopfstütze und die geöffneten Gurte befestigt.

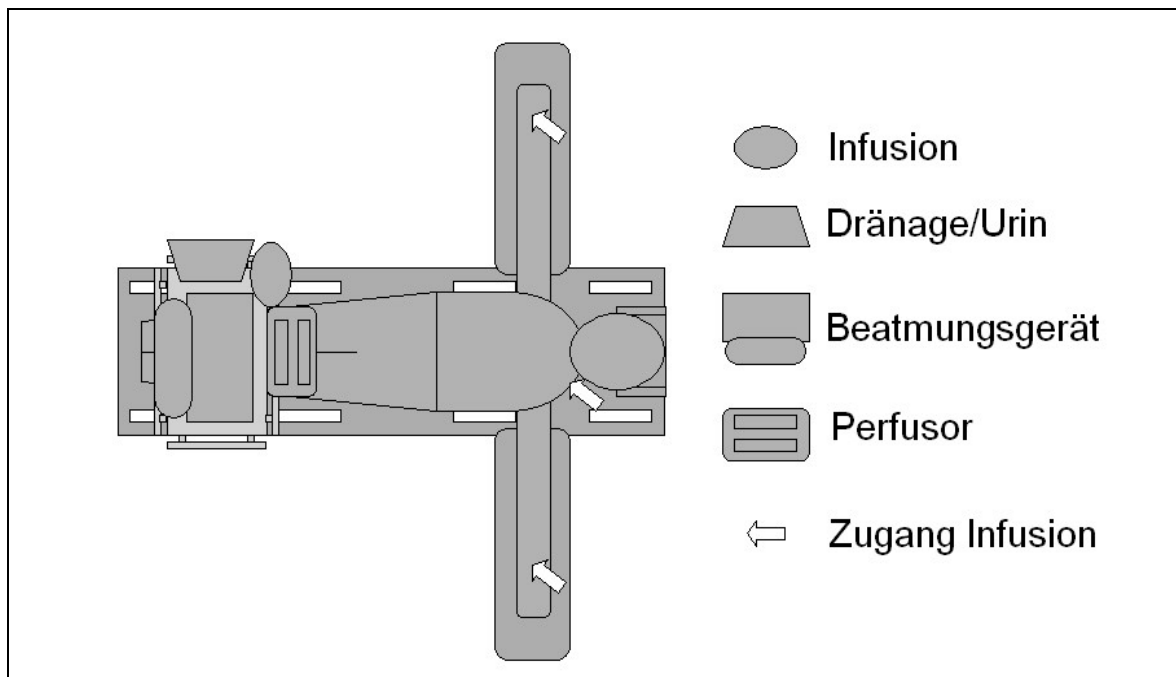


Abb. 2-10: Integration des Auflagesystems in den Schockraumbereich

Die Diagnose beinhaltet in der Regel die Erstellung von einem oder mehreren Röntgenbildern, z.B. der Halswirbelsäule, des Thorax oder der Hüfte. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Liege mittig auf dem Schockraumtisch befindet, da sonst die seitlich am Schockraumtisch angebrachten Metall- Montageschienen als Artefakte auf dem Röntgenbild erscheinen. Weiterhin können die Halter der Armauflagen als Artefakte abgebildet werden. Der Tischaufsatz kann erst nach Erstellung der Röntgenbilder montiert werden.

Nach abgeschlossener Untersuchung werden die Armauflagen demontiert oder zur Längsseite gedreht und hochgeklappt. Die Arme werden an den Körper angelegt. Durch Schließen der Gurte werden sie in der seitlichen Position gehalten und der Patient auf der Liege gesichert. Er ist nun transportfähig und wird zusammen mit dem Auflagesystem als Einheit vom Schockraumtisch auf den Transporter verlagert und zum CT- Bereich gefahren. Den Verlauf im CT- Bereich zeigt das folgende Kap. 2.5.2. Die weiteren Prozessschritte sind bzgl. der Umlagerung ähnlich und werden daher nicht weiter beschrieben.

2.5.2 Prozesskette „Intensivmedizinische Diagnose“

Vorstellung der Prozesskette

Die Prozesskette der bildgebenden Diagnostik für Intensivpatienten mit den dafür notwendigen innerklinischen Transporten zeigt **Abb. 2-11**.

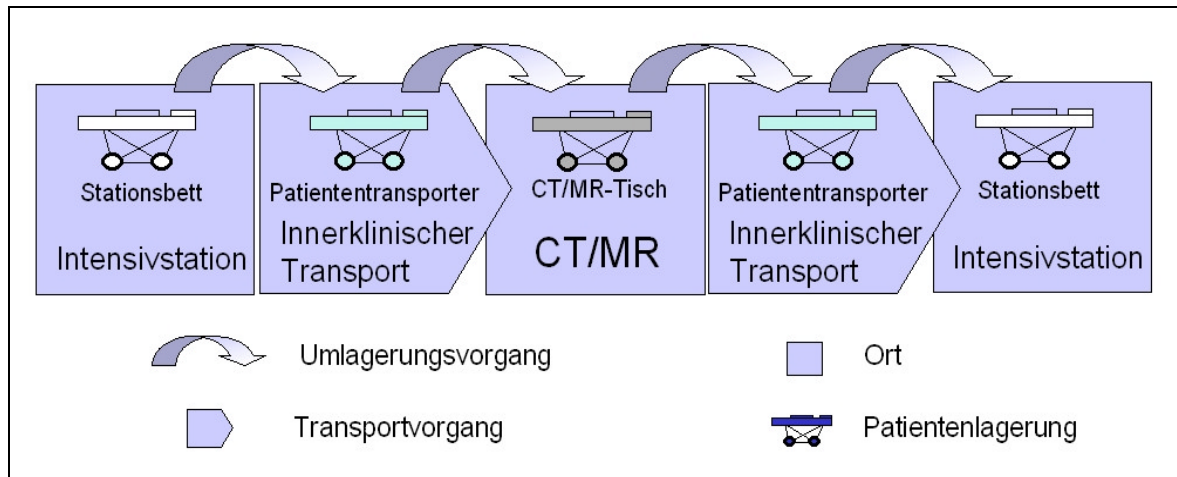


Abb. 2-11: Prozesskette „Bildgebende Diagnostik Intensivpatient“

Der Transport von der Intensivstation kann mit einem separaten Transporter oder mit dem Stationsbett des Intensivpatienten durchgeführt werden. Bei der Verwendung des Transporters ist ein Umlagerungsvorgang notwendig, der z.B. durch Herüberziehen mit einem Tuch in Querrichtung erfolgt (vgl. Abb. 2-1). Bei Intensivpatienten müssen Versorgungselemente oder -geräte mit umgesetzt werden, z. B. Infusionen, Perfusoren³, Katheter und ein Beatmungsgerät. Diese liegen entweder auf dem Patienten oder sind an einem separaten mit Rollen versehenen Wagen befestigt, der mit transportiert werden muss.

Im CT- Bereich erfolgt die Umlagerung auf die CT-Liege, wobei die Zusatzelemente wiederum mit umgesetzt werden müssen, **Abb. 2-12**. Damit die Arme des Patienten während der Bewegung durch die Gantry (vgl. Abb. 2-7) beim Aufnahmeprozess nicht seitlich abstoßen, werden diese häufig mit Klettbandern oder Klebeband seitlich angebunden oder, insbesondere bei Thoraxaufnahmen⁴, über den Kopf hinweg ausgestreckt positioniert. Nach der Aufnahmesequenz

³ Perfusor: Gerät zur Betätigung von Spritzenkolben für die zeitlich- dosierte Verabreichung von Medikamenten

⁴ Thorax: Brustkorb

erfolgt die erneute Umlagerung zurück auf das Transportmittel und der Rücktransport zur Station. Dort ist evtl. eine letzte Umlagerung auf das Stationsbett nötig, sofern dieses nicht bereits für den Transport verwendet wurde.

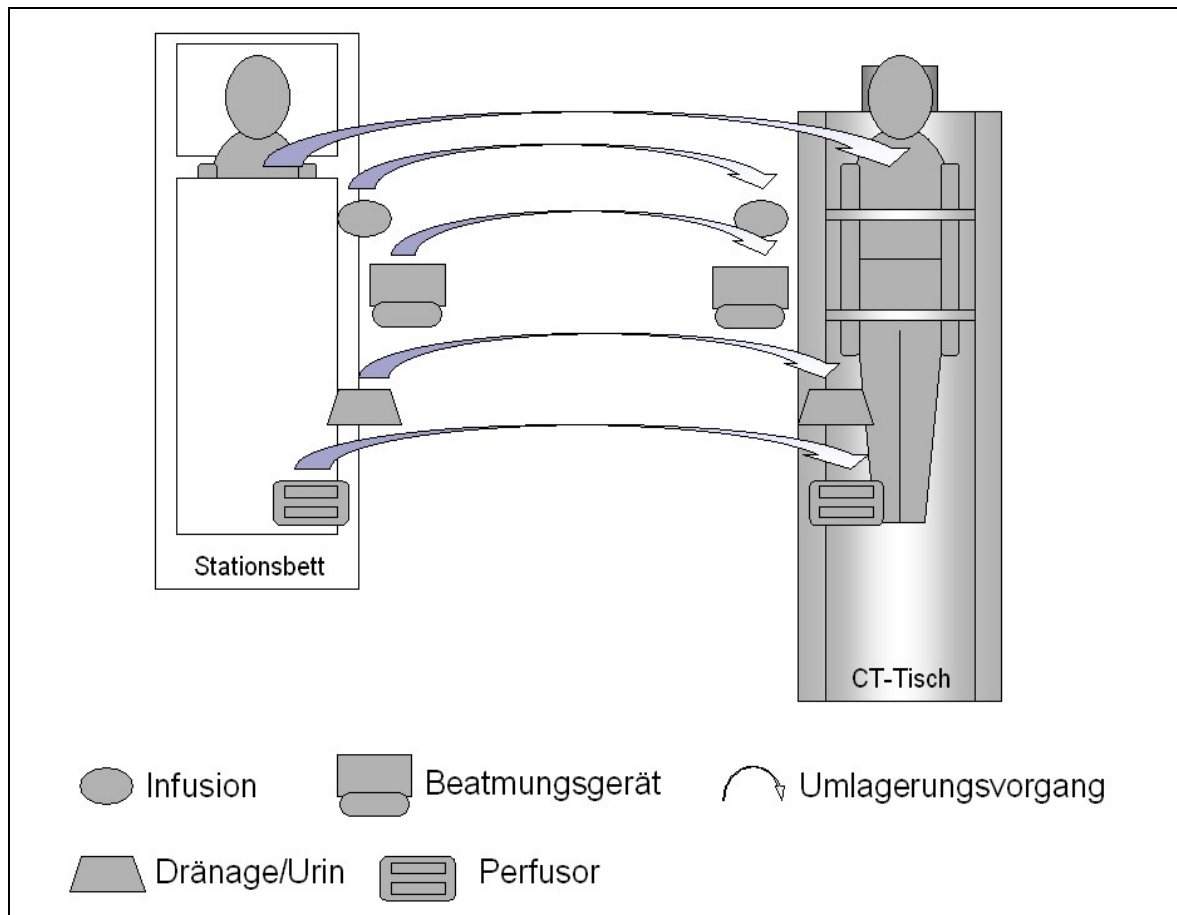


Abb. 2-12: Umlagerungsvorgang im CT bei Intensivpatienten (schematisch)

Integration des Auflagesystems in die Prozesskette

„Intensivmedizinische Diagnose“

Für die intensivmedizinische Diagnose wird der Patient auf der Station vorbereitet. Im Stationsbett wird das Liegenelement des Auflagesystems unter den Patienten geschoben. Das bedeutet für das Personal der Intensivstation gegenüber den bisherigen Abläufen einen zusätzlichen zeitlichen Aufwand. Anschließend kann der Tischaufsatz von oben an dem Liegenelement montiert und der Patient an die am Tischaufsatz befestigten Versorgungsgeräte angeschlossen werden. Die Arretierung des Aufsatzes muss dabei von oben möglich sein, während sich die

Unterseite des Liegenelementes durch das Gewicht des Patienten in die Stationsbettmatratze drückt.

Der Transport kann im Stationsbett oder mit Hilfe eines Patiententransporters erfolgen. Im Falle der Verwendung des Transporters ist ein Umlagerungsvorgang notwendig, der durch das Auflagesystem erleichtert wird.

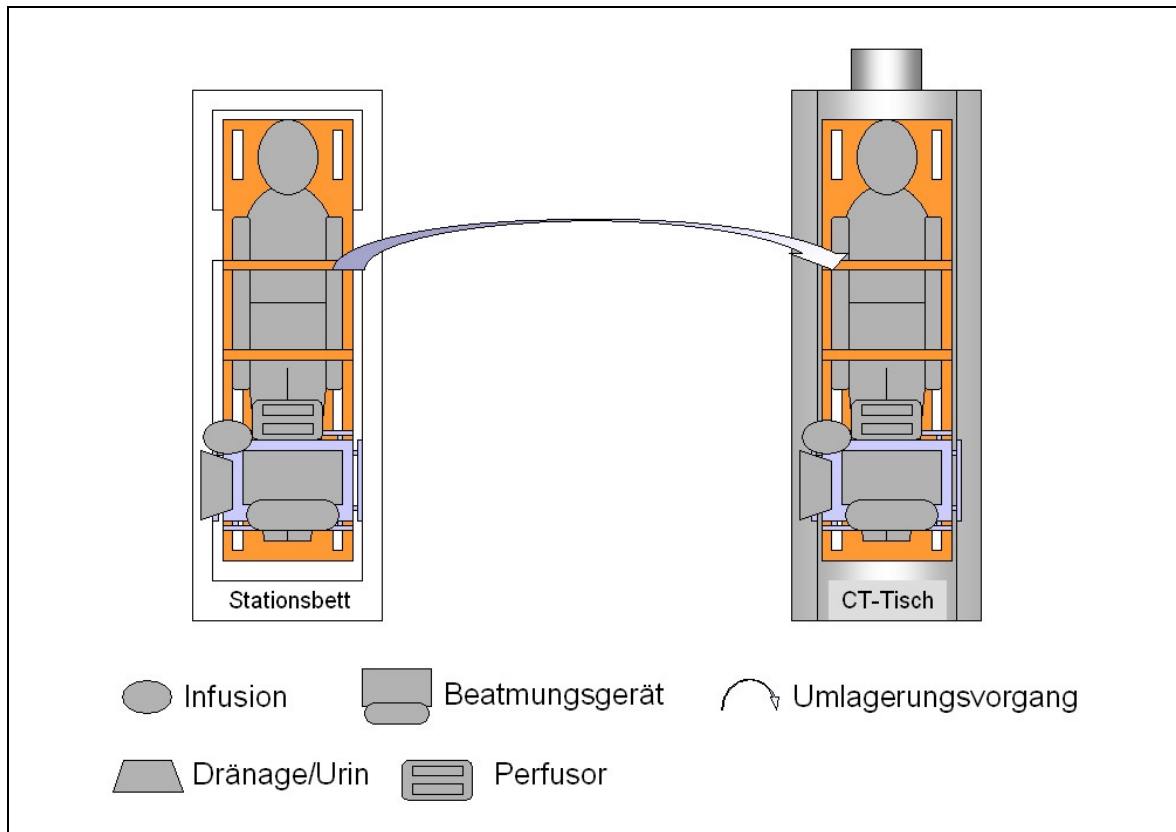


Abb. 2-13: Umlagerungsvorgang mit Auflagesystem (schematisch)

Im Diagnose- Bereich angekommen, werden Patient und Auflagesystem als komplette Einheit auf die Liege des Diagnosegerätes umgelagert, **Abb. 2-13**. Der zusätzliche Zeitaufwand, der auf der Intensivstation aufgewendet wurde, kann nun durch die schnellere Umlagerung kompensiert werden.

Nach erfolgter Diagnose werden Patient und Auflagesystem wieder auf das Transportsystem umgelagert und zurück zur Intensivstation transportiert. Auf der Intensivstation wird die Versorgung wieder auf stationäre Geräte umgestellt, der Tischaufsatz demontiert und das Liegenelement unter dem Patienten entfernt.

Da die Liegefläche des Diagnosegerätes konkav gestaltet sein kann und die Gesamthöhe des Auflagesystems gering sein soll, besteht für das medizinische

Personal während des Herüberhebens und Absetzens die Gefahr, dass deren Finger eingeklemmt werden. Die Gefahr des Fingerquetschens besteht aufgrund der geringen Höhe generell immer, wenn die Liege bezüglich der Längsachse im Winkel abgesetzt wird. Dieses Problem muss durch eine besondere Gestaltung der Haltebereiche vermieden werden.

Die konkave Liegefläche bedeutet weiterhin, dass mindestens ein Adapter vorhanden sein muss, der auf der Unterseite die zur Liegefläche negative, konvexe Form aufweist und auf der Oberseite eben ist, um das Auflagesystem aufzunehmen. Gleichzeitig ist eine mittige Ausrichtung zur Geräteachse notwendig, um eine Kollision mit der Gantry zu vermeiden. Auch dieser Adapter muss voll röntgenkompatibel sein.

Für Diagnosen im Bereich des Schädels werden in der Regel spezielle Halter zur Fixierung des Kopfes eingesetzt. Es muss daher die Möglichkeit bestehen, die vorhandenen Kopfhalter an dem Liegenelement auch direkt befestigen zu können. Die Verwendung von weiteren Kopfhaltern zur Fixierung muss möglich sein.

Bei montiertem Tischaufsatz muss darauf geachtet werden, dass die gesamte Einheit nicht zu weit in das Gerät gefahren wird, da der Tischaufsatz sonst mit der Gantry des CT- Gerätes (vgl. Abb. 2-7) kollidieren kann. Dadurch wird der mögliche Untersuchungsbereich verringert.

Da bei Verwendung des Stationsbettes als Transportmittel die Anzahl der Umlagerungsvorgänge nicht sehr hoch ist, aber ein zusätzlicher Arbeitsaufwand auf der Intensivstation entsteht, der erst kompensiert werden muss, kann durch die Verwendung des Auflagesystems nur mit einer geringen Zeiteinsparung gerechnet werden. Dennoch ist der Umlagerungsvorgang für den Patienten schonender und die Belegungszeit der Diagnosegeräte kann deutlich verringert werden. Erfolgt die Verwendung eines separaten Transporters statt des Stationsbettes, ist ein größerer Nutzen zu erwarten, da der zusätzlich notwendige Umlagerungsvorgang ebenfalls erleichtert wird. Der Transport kann auch bei zeitunkritischen Vorgängen mit einem Umbetter (vgl. Kap. 2.3.2) durchgeführt werden.

2.5.3 Manuelle Umlagerungsvarianten

Durch die Verwendung des Auflagerungssystems bei manuellen Umlagerungsvorgängen ergeben sich eine Reihe von Arbeitsmethoden, die mit einem Tuch nicht möglich sind. Die Umlagerungsvarianten sind in den **Abb. 2-14** bis **Abb. 2-17** dargestellt und im Folgenden erläutert.

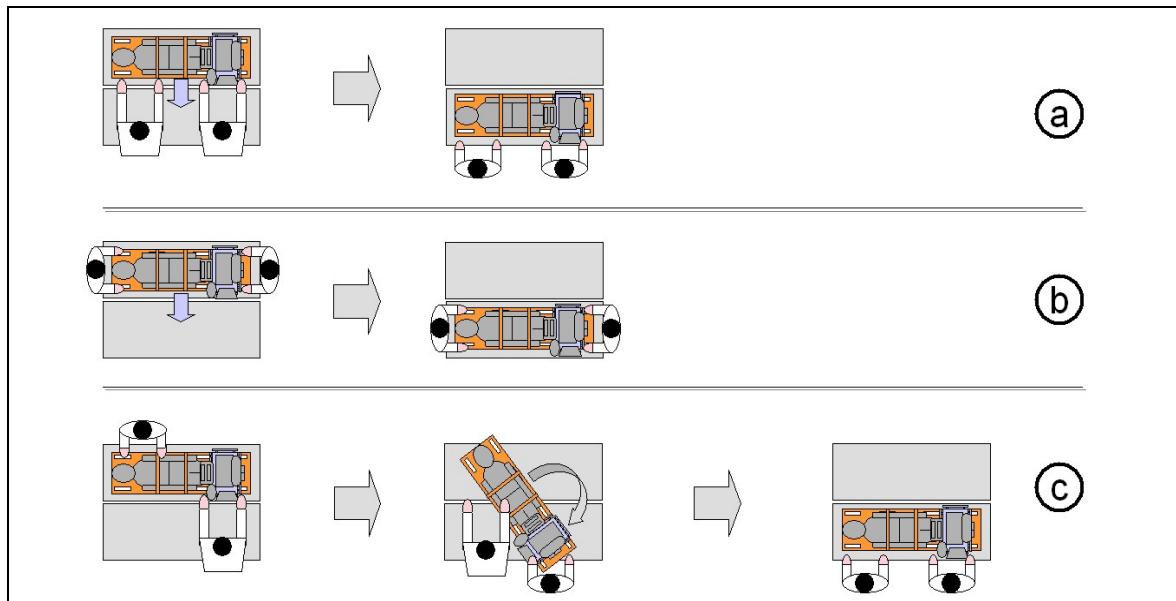


Abb. 2-14: Umlagerung mit Auflagen nebeneinander

Die Umlagerungsart „a“ in Abb. 2-14 entspricht dem gegenwärtigen Stand der Technik, wobei das Personal in vorn übergebeugter Haltung den Umlagerungsvorgang ausführen muss. Eine Breite der zweiten Auflagefläche zwischen 50 und 60 cm gestattet dabei noch das Herüberziehen mit beiden Händen und geringer Beugung des Oberkörpers. Das Auflagesystem hat bis zu dieser Breite gegenüber dem Tragetuch ergonomische Vorteile. Beträgt die Breite der zweiten Auflage mehr als 80 cm, ist ohne Abstützung mit einem Arm kein Herüberziehen möglich, wenn der Kraftangriffspunkt direkt seitlich am Auflagesystem ist. Diese Breite wird z. B. von Stationsbetten überschritten. Ein Tragetuch gestattet oberhalb von 60 cm durch weiteres seitliches Ausbreiten eine Verlängerung des Kraftangriffspunktes nach außen, wodurch das medizinische Personal eine aufrechte Haltung einnehmen kann und damit die Beanspruchung auf die Wirbelsäule verringert wird, obwohl die aufzubringende Zugkraft ansteigt (vgl. Kap. 4.1.1). Die Anwendung dieser Umlagerungsvariante erfordert bei großen

Umlagerungsbreiten am Auflagesystem eine Verlängerung des Kraftangriffspunktes. Der Umlagerungsvorgang kann durch das Ausnutzen der guten Gleitfähigkeit des Auflagesystems und Nutzung eines Höhenunterschiedes zwischen den Auflagen 1 und 2 erleichtert werden.

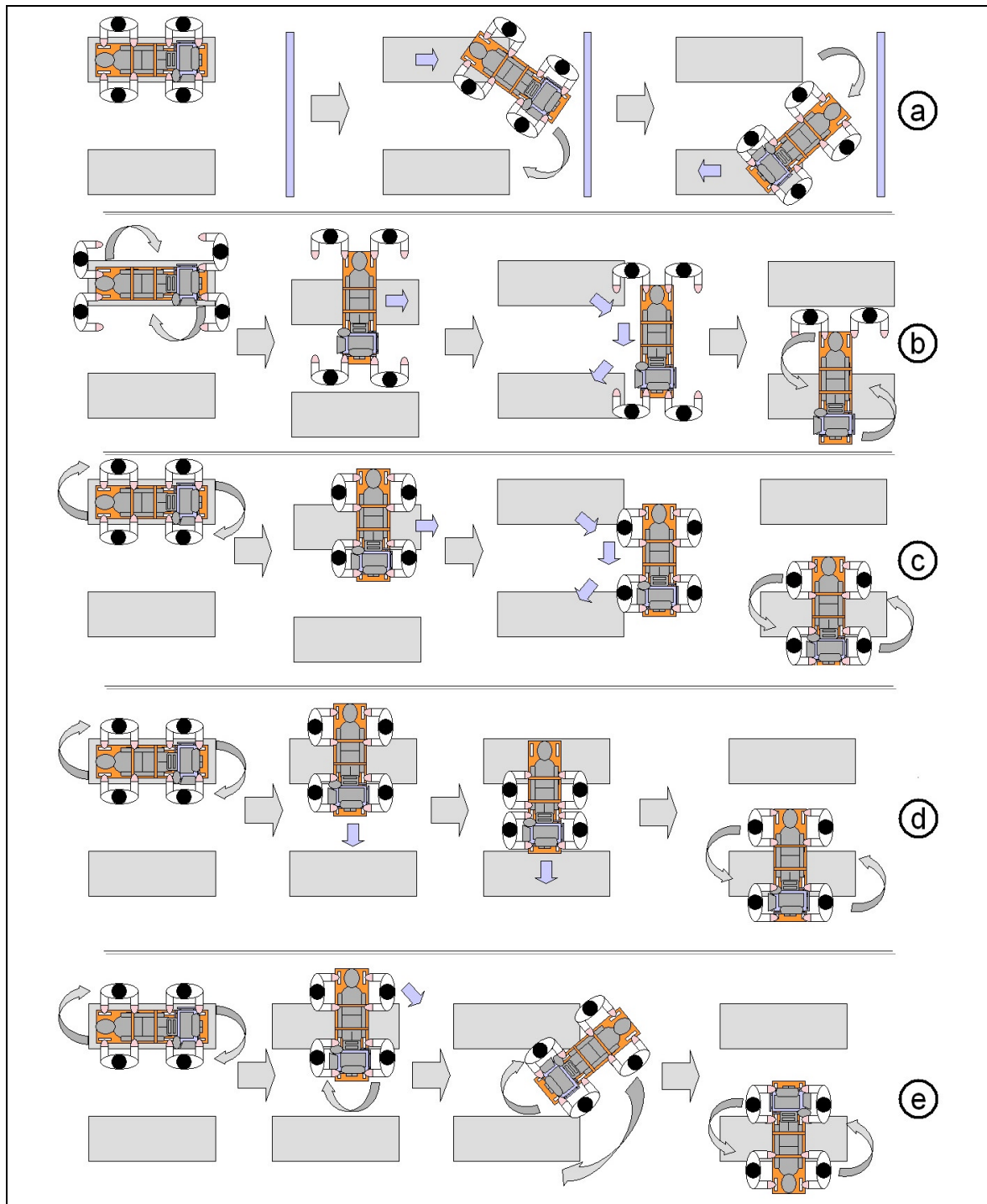


Abb. 2-15: Umlagerung mit Abstand zwischen den Auflagen

Die Variante „b“ in Abb. 2-14 zeigt die Haltemöglichkeit an Kopf- und Fußende. Die Last kann dicht am Körper geführt werden und die Belastung der Lendenwirbelsäule wird dadurch vermindert. Problematisch ist diese Art der Umlagerung evtl. im CT, wenn zwischen Gantry und CT-Liege nicht ausreichend Platz für das Personal vorhanden ist. Diese Variante ist mit einem Tuch nicht ausführbar.

Bei der Variante „c“ in Abb. 2-14 wird die Umlagerung durch zwei Halbdrehungen erreicht. Dadurch kann das System bei vorhandenen Höhenunterschieden zwischen den Auflagern nicht so stark um die Längsachse kippen. Alle drei Varianten können (sollten) mit vier Personen ausgeführt werden.

Die zweite Möglichkeit die Auflagern zu positionieren besteht darin, diese mit Abstand längs nebeneinander zu stellen. Dadurch ergeben sich eine Reihe von Möglichkeiten, wie sie Abb. 2-15 dargestellt sind. Es ist stets möglich, mit vier Personen die Umlagerung durchzuführen, allerdings muss das System nun vollständig getragen werden. Die Gewichtsverteilung ist nahezu ausgeglichen, da dem Oberkörpergewicht bzgl. der Mitte des Systems das Gewicht des Tisches mit Equipment gegenübersteht.

Bei der nächsten Möglichkeit werden die Auflagern unter einem Winkel zueinander positioniert. Dadurch kann eine Drehung des Systems eingespart und die Wegstrecke unter Halten der Last verringert werden, Abb. 2-16.

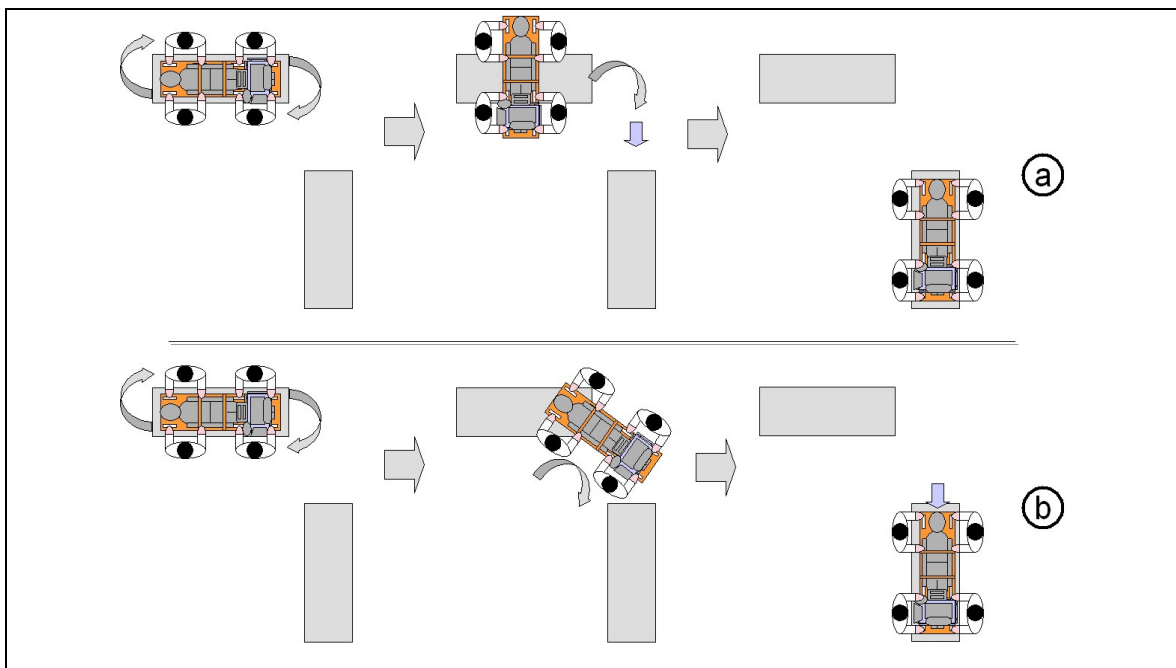


Abb. 2-16: Umlagerung mit Auflagern unter einem Winkel von 90°

Die letzte Möglichkeit besteht darin, die Auflagen längs aneinander anzuordnen, Abb. 2-17. Die Last muss ein kurzes Stück gehalten und bewegt werden. Diese Art der Umlagerung ist kraftaufwändig, wenn die Auflagen sehr breit sind und das System damit nicht dicht am Körper gehalten werden kann.

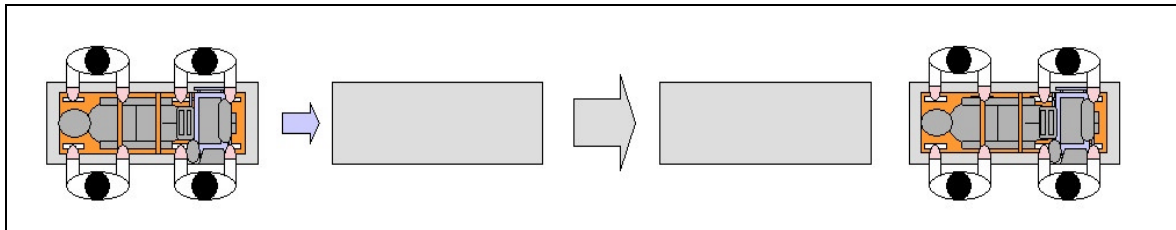


Abb. 2-17: Umlagerung mit Auflagen längs aneinander

Die Anzahl der möglichen Umlagerungsvarianten vermindert sich extrem, wenn die Bewegung des Auflegesystems in Längsrichtung zur Auflage 1 oder 2 nicht möglich ist. Dies tritt z. B. dann ein, wenn bei Stationsbetten ein fixes Fußende vorhanden ist. Ein Anheben über dieses Fußende hinweg wäre sehr kraftaufwändig und unergonomisch.

2.6 Funktionale Anforderungen

Für die Verwendung des in Kapitel 2.2 beschriebenen prinzipiellen Konzeptes des Patientenauflegesystems innerhalb der vorgestellten Prozessketten lassen sich bezüglich der Funktion grundlegende Anforderungen ableiten:

➤ Multifunktionales System

Es werden Halter für Infusionslösungen benötigt, die in jedem Körperbereich montierbar sind. Drehbare, höhenverstellbare und klappbare Armauflagen sind im Bereich des Schockraumes für die Erstversorgung notwendig. Ein Tisch für die Versorgungseinheiten des Patienten, z.B. für das Beatmungsgerät, muss im Fußbereich montierbar sein. Es müssen verschiedene, der Situation angepasste Kopfstützen verwendet werden können.

➤ Einfache, schnelle und sichere Handhabung der Modulteile

Durch die Stresssituation, die z.B. ein Notfall für das medizinische Personal darstellt, muss sichergestellt sein, dass eine intuitive, schnelle und sichere Anwendung gewährleistet ist. Die Funktion aller Teile muss selbsterklärend sein, um Fehlbenutzung auszuschließen. Die Montage bzw. Demontage von Modulteilen muss schnell erfolgen können, um Zeit einzusparen. Die gewünschte Stellung muss fixierbar und gegen unbeabsichtigtes Lösen gesichert sein.

➤ Stabile Lagerung und Fixierung des Patienten

Der Patient soll auf dem System liegend bei Umbettungsvorgängen möglichst gering mechanisch belastet werden, um weitere Traumatisierungen auszuschließen. Hierzu ist es notwendig, dass der Patient mit dem System eine Einheit bildet. Die Sicherung von Kopf, Rumpf und Extremitäten gegen Längs- und Querverrutschen wird durch Befestigungsmöglichkeiten z.B. Gurte gewährleistet. Für die Reanimation ergibt sich die Anforderung einer möglichst steifen und planen Auflagefläche im Oberkörperbereich.

➤ Anpassbarkeit und Handhabbarkeit

Die Anpassung der Module an Körpermaße bzw. Versorgungsbedürfnisse des Patienten muss sichergestellt sein. Hierzu gehören die Möglichkeit des Verschiebens von Haltern oder die Drehbarkeit und Höhenverstellbarkeit der Armauflagen. Für die Benutzung in den Bereichen CT und MRT müssen die maximalen geometrischen Abmaße berücksichtigt werden. Dies ergibt für das Liegenelement eine Maximallänge unter 200 cm, eine Gesamtbreite von unter 50 cm, eine Aufstandsflächenbreite von weniger als 40 cm und eine Höhe von unter 5 cm im Bereich des Körpermittelpunktes (vgl. Kap. 2.7.2). Die Höhe von unter 5 cm gewährleistet, dass der Patient mittig in die geneigte Gantry des CT-Gerätes geschoben werden kann. Für den Transport in engen Fluren und Treppen oder durch schmale Türen müssen Tragemöglichkeiten im Kopf- und Fußbereich vorhanden sein. Für den Umlagerungsvorgang sind vier seitliche Tragemöglichkeiten erforderlich. Ein Anheben von einer ebenen Fläche muss ebenfalls gegeben sein.

➤ Desinfizierbarkeit

Alle Elemente müssen separat desinfiziert werden können. Für die gründliche Reinigung sind unzugängliche Stellen, Spalten, kleine Öffnungen oder Hohlräume zu vermeiden.

➤ Ungefährliche Handhabung durch das medizinische Personal

Alle Teile müssen so gestaltet sein, dass kein Verletzungsrisiko durch die Benutzung besteht. Das Anheben der Liege von einer ebenen Fläche bzw. ein seitliches Ankippen der Liege während eines Umbettungsvorganges muss ohne Quetschgefahr der Hände erfolgen können. Beim Öffnen von Arretierungsmechanismen dürfen diese nicht plötzlich bzw. schlagartig aufspringen.

➤ Langlebigkeit und Kontrolle

Das Auflagesystem ist für eine Einsatzdauer von mindestens 10 Jahren auszulegen. In regelmäßigen Abständen ist die Einsatzfähigkeit zu überprüfen. Gegebenenfalls wird eine Instandsetzung oder Reparatur notwendig werden, die daher auch möglich sein muss.

2.7 Ergonomie- Anforderungen

Die Ergonomie berücksichtigt die Eigenschaften, Fähigkeiten und Bedürfnisse, die durch die Anatomie des Menschen an Form und Funktion eines technischen Erzeugnisses gestellt werden [PAHL97, S. 366]. Es lassen sich daher für den gegebenen Anwendungsfall allgemeine ergonomische Anforderungen ableiten. Für die gestalterische Ausarbeitung müssen die menschlichen Körpermaße und –kräfte Berücksichtigung finden.

2.7.1 Allgemeine Anforderungen

Im vorliegenden Anwendungsfall muss die Ergonomie für das beteiligte Personal und für den Patienten berücksichtigt werden.

Wie bereits gezeigt wurde, bedeutet der manuelle Umlagerungsvorgang für das medizinische Personal eine hohe körperliche Belastung. Diese führt je nach Person zu unterschiedlichen Beanspruchungen. Das Personal muss zurzeit einzig durch die eigene Muskelkraft die Umlagerung sicher durchführen. Die Lastenhandhabungsverordnung [BGBL96] nennt die möglichen Einflussfaktoren für alle Beschäftigten u. a. im Hinblick auf die:

- Zu handhabende Last
 - Gewicht, Form, Größe, Lage der Zugriffsstellen, Schwerpunktlage, Möglichkeit einer unvorhergesehenen Bewegung
- Zu erfüllende Arbeitsaufgabe der Beschäftigten
 - Körperhaltung oder -bewegung, insbesondere Drehbewegung, Entfernung der Last vom Körper
 - Zu überbrückende Entfernung durch Heben, Senken und Tragen der Last
 - Ausmaß, Häufigkeit und Dauer des erforderlichen Kraftaufwandes
- Beschaffenheit des Arbeitsplatzes und der Arbeitsumgebung
 - Platz und Raum in vertikaler Richtung
 - Höhenunterschied zwischen verschiedenen Ebenen
 - Ebenheit, Rutschfestigkeit oder Stabilität der Standfläche

Aus den oben genannten Faktoren lassen sich grundsätzliche Forderungen beim Tragen und Führen von Lasten ableiten:

- Das Halten und Führen der Last so dicht wie möglich am Körper führt zu geringeren Belastungen der Wirbelsäule (vgl. Kap. 4.1.1).
- Die Trageposition in Höhe des Beckens mit evtl. Abstützung im Beckenbereich ermöglicht eine Entlastung und gerades Stehen bei nahezu ausgestreckten Armen sowie Heben und Senken durch Beugung der Beine.
- Der Schwerpunkt der Last muss möglichst tief bzgl. des Kraftangriffspunktes liegen.
- Das Führen, Bewegen und Heben von Lasten muss bei geringer Rotation und Beugung der Wirbelsäule ausgeführt werden.
- Die Kontrolle des Führens der Last ist durch einen in Krafrichtung steifen Kraftangriffspunkt (z.B. steifer Griff statt weiches Elastomerband) günstiger.
- Ein Heben der Last wird umgangen durch die Erhöhung der ersten Auflagefläche, von der die Last aufgenommen wird, gegenüber der zweiten Auflagefläche, auf die die Last abgelegt wird.
- Es müssen zusätzliche Belastungen vermieden werden, die die Körperspannung beeinträchtigen. Es muss eine geringe Schließkraft der Hände zum Halten möglich sein. Die Einleitung der Tragkraft erfolgt durch gleichmäßig geringen Druck in die Hand.

Für den Patienten ist eine sichere Lagerung wichtig, die nur eine geringe Bewegungsmöglichkeit zulässt. Der Kopf muss bezüglich des Körpers gesichert sein. Insbesondere die Drehung des Kopfes muss verhindert werden können, da beim Umlagerungsvorgang ein Kippen der Liegefläche in Bezug auf die Längsachse möglich ist.

Das Gewicht des Patienten muss gleichmäßig ohne Druckspitzen auf die Liegefläche übertragen werden. Dies wird durch eine anatomisch gerechte Form der Liegefläche im Kopf-, Lendenwirbel- und Kniebereich und eine gepolsterte

Auflage für den gesamten Bereich erreicht. Es ergibt sich damit ein Zielkonflikt in Bezug auf die geforderte Steifigkeit bei notwendiger Reanimation sowie die möglichst geringe Gesamthöhe. Es muss ein Optimum aus Dicke und Härte der gepolsterten Auflage gefunden werden.

2.7.2 Daten und Maßanforderungen

Für die Erstellung der Elemente müssen mindestens die körperlichen Merkmale und die körperlichen Fähigkeiten des Menschen berücksichtigt werden. Dies sind insbesondere die Körpermaße, das Gewicht, die Bewegungsmöglichkeiten und die Kräfte. Alle Abmessungen sind so zu wählen, dass für über 90 % der Patienten ausreichend Komfort und Platz besteht.

Wichtige menschliche Körpermaße zeigt **Abb. 2-18**.

Abmessungen in cm	5. Perzentil ⁵ , weiblich	95. Perzentil, weiblich	5. Perzentil, männlich	95. Perzentil, männlich
Körperhöhe	151	172,5	162,9	184,1
Schulterhöhe	123,4	143,6	134,9	154,2
Kopf- und Halshöhe	27,6	28,9	28	30,1
Reichweite nach vorne	61,6	76,2	66,2	78,7
Reichweite nach oben, beidarmig	174,8	200	191	221
Hüftbreite stehend	31,4	40,5	31	36,8
Schulterbreite	32,3	38,8	36,7	42,8
Körpertiefe	23,8	35,7	23,3	31,8

Abb. 2-18: Körpermaße von deutschen Erwachsenen nach [LAN02, S. 9]

Die Liegefläche muss eine Länge von mindestens 195 cm und zumindest im Bereich der Schulter und Hüfte eine Breite von mehr als 40 cm aufweisen. Ein evtl. einschiebbares Kopfteil (vgl. Kap. 4.2.3) muss eine Länge von 30 cm aufweisen.

⁵ Perzentil: Hundertstelwert

Für die Lagerung der abgespreizten Arme ist eine ausreichende Breite vorzusehen. Diese ergibt sich aus der Reichweite und der Schulterbreite zu ca. 200 cm. Aus diesem Wert und einer Breite des Liegenelementes von ca. 50 cm resultiert eine freie Länge der Armauflagen von ca. 75 cm, wenn die Hände bis zur Spitze aufliegen sollen. Ist dies nicht notwendig, reicht eine freie Länge von 65 cm aus.

Der als Geräteträger verwendbare Tischaufsatz ist für eine Position im Fußbereich vorgesehen. Hierbei ist eine Höhe von 30 cm ausreichend. Für eine Verwendung des Tischaufsatzes im Brustkorbbereich des Patienten ist mindestens eine Höhe von 40 cm vorzusehen.

Nach [LAN02, S. 51] müssen Griffe für das Tragen von Lasten per Hand bestimmte Mindestradien aufweisen. Für eine Last zwischen 100 und 200 N beträgt der Mindestradius 10 mm und für Lasten über 200 N schon 13 mm.

Außer den Körpermaßen müssen auch die Kräfte und Bewegungen berücksichtigt werden, die das medizinische Personal bei der Benutzung des Auflagesystems aufwenden muss. In der Ergonomie werden dafür Beurteilungskriterien für eine menschengerechte Gestaltung aufgestellt. Man unterscheidet u. a. die Begriffe Ausführbarkeit, Erträglichkeit, Zumutbarkeit und Beanspruchung [LAU90, S. 14].

Die Ausführbarkeit gibt an, ob die Arbeit überhaupt bei gegebenen Kräften und Abmessungen ausgeführt werden kann. Nach [LAU90, S. 52] beträgt beispielsweise die kurzfristig abgebbare maximale Haltekraft eines seitlich herabhängenden Armes bei Frauen durchschnittlich 400 N und bei Männern 800 N. Die schwächsten Frauen erreichen Werte um 200 N, etwa 95 % aller Frauen erreichen Werte über 250 N. Männer erreichen mindestens 350 N, etwa 95 % aller Männer erreichen mindestens 550 N. Wird das Patientenauflegesystem an vier Griffen gehalten, kann damit ein Gewicht von mindestens 800 N von vier Frauen und ca. 2200 N von vier Männern kurzzeitig aufgebracht werden. Kann das Tragen mit zwei Armen ausgeführt werden, so können diese Grenzen nicht exakt verdoppelt werden, da die Beanspruchung der Rückenmuskulatur durch das Halten mit zwei Armen vor dem Körper ansteigt. Für zwei weibliche Personen ist das Halten des Systems mit Patient in den meisten Fällen nicht ausführbar.

Die Erträglichkeit gibt an, ob eine Arbeit regelmäßig und mit täglicher Wiederholung ohne Beeinträchtigung der Gesundheit ausgeführt werden kann [LAU90, S. 15].

Die Zumutbarkeit berücksichtigt u. a. den Faktor Zeit. Beispielsweise können die maximalen Haltekräfte nur für wenige Sekunden aufgebracht werden. Die halbe Maximalkraft kann etwa 1 Minute gehalten werden. Beträgt die Kraft nur etwa 15 % der Maximalkraft, so kann diese dauerhaft gehalten werden [LAN02, S. 48].

Eine weiterer Begriff in der Ergonomie ist die Beanspruchung. Diese berücksichtigt die Stärke der Belastung bezüglich der Fähigkeit des Organismus. Es bestehen vier Möglichkeiten zur Beeinflussung dieser Beanspruchung: Die Belastung kann durch Arbeitsgestaltung verringert werden, die Eigenschaften können durch Übung verändert werden, die Personen können nach ihrer Eignung ausgewählt werden und die Arbeitsmethode (vgl. Kap. 2.5.3) kann verändert werden [LAU90, S. 31].

2.8 Technologische Anforderungen

Die technologischen Anforderungen leiten sich zum Teil aus dem bereits beschriebenen prinzipiellen Konzept und den funktionalen Anforderungen ab. Darüber hinaus haben die verwendeten Diagnoseverfahren entscheidenden Einfluss, das haben die Ausführungen in Kap. 2.4 bereits gezeigt. Insgesamt stellen die Werkstoffanforderungen den wichtigsten Bereich dar; sie werden daher ausführlich betrachtet.

Allgemeine technische Forderungen lassen sich aus dem prinzipiellen Konzept und den funktionalen Anforderungen ableiten:

➤ Festigkeit

Das Patientengewicht kann in Ausnahmefällen Werte im Bereich von 1500 N erreichen. Gleichzeitig muss bei einer eventuellen Reanimation im Schockraum das Gewicht des behandelnden Arztes hinzugerechnet werden, da sich dieser dabei über dem Patienten, d. h. mit auf der Liege befindet, wobei die Liege evtl.

nur am Kopf- und Fußende gelagert ist. Diese Auflagerungsart ergibt sich aus der Forderung nach einem großen, durch einen Röntgenbogen durchstrahlbaren Bereich. Für den Transport werden die Griffbereiche an Kopf- oder Längsseite verwendet, die damit mindestens der Belastung des Patientengewichtes ausgesetzt sind (vgl. Kap. 4.1.1). Nach [DIN99] werden zur Prüfung der gesamten Liege Gewichte zwischen 1500 N und 2500 N verwendet (vgl. Kap. 7.2.1). Für die Dimensionierung wird das Vierfache des möglichen Patientengewichtes zugrunde gelegt, was einer Gesamtbelastung von 6000 N entspricht (vgl. Kap.5).

➤ Geringes Gesamtgewicht und hohe Steifigkeit

Das Gesamtgewicht des Auflagesystems muss gering sein, um beim Umlagerungsvorgang die körperliche Belastung des bedienenden Personals nicht merklich zu erhöhen. Gleichzeitig muss eine hohe Steifigkeit der Liege gewährleistet sein. Modulteile sollten bezüglich der angreifenden Belastungen ausreichend steif sein und dabei ein geringes Gewicht aufweisen.

Werkstoffanforderungen

Die eingesetzten Werkstoffe müssen für die Verwendung in den Bereichen Schockraum, CT und MRT geeignet sein. Die Werkstoffauswahl erfolgt in Kap. 2.9.

➤ Geringe Röntgenabsorption und geringes Gewicht

Die wichtigste Forderung ist, dass die Absorption von Röntgenstrahlung bezüglich der Liege so gering wie möglich sein muss, was besonders auf Werkstoffe mit niedriger Ordnungszahl zutrifft (vgl. Kap. 2.4). Gleichzeitig sollte das Gewicht möglichst niedrig sein. Hieraus lässt sich folgern, dass Werkstoffe mit geringer Dichte, aber gleichzeitig hoher Festigkeit und Steifigkeit, eingesetzt werden müssen.

➤ Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse

Die verwendeten Werkstoffe müssen beständig gegenüber den gegebenen Umwelteinflüssen sein. Folgende Umwelteinflüsse können u. a. auftreten:

- UV- Licht
- Röntgenstrahlung
- Elektromagnetische Wechselfelder
- Aggressive (flüssige) Stoffe
 - Körperflüssigkeiten wie Blut, Schweiß und Urin
 - Desinfektionsmittel in Form von organischen Lösungsmitteln
 - Reinigungsmittel in Form von Laugen
 - Kochsalzlösungen und destilliertes Wasser

Häufig verwendete Flüssigkeiten sind nach [CAM01]: 1-, 2-Propanol, Ethanol, Bispyrimidin- Amin- Derivat, Glucoprotamin, Benzylalkohol, Wasserstoffperoxid, Poly- (oxy -ethylan) fettsäureester, Isopropanol und Benzalkoniumchlorid.

Die Umwelteinflüsse, die durch die Desinfektionsmittel und –verfahren entstehen, finden sich in [RKI02].

➤ Explosionsschutz und elektrostatische Leitfähigkeit

Durch den Umgang mit reinem Sauerstoff, Chlorethyl als Schmerzmittel [CAM01] und brennbaren Flüssigkeiten, die für die Desinfektion verwendet werden, entstehen explosionsfähige Zonen. Deshalb muss die elektrostatische Leitfähigkeit immer gewährleistet sein. Die Aufladung könnte sonst zu einer Entladung unter Entstehung eines zündfähigen Funkens führen. Weiterhin könnten elektrische Geräte gestört oder beschädigt werden oder die Entladung könnte bei Berührung über den Patientenkörper oder das behandelnde Personal erfolgen.

Die Richtlinie für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladung [BGR132] fordert, dass alle leitfähigen berührbaren Teile an ortsfesten oder beweglichen Einrichtungsgegenständen untereinander und mit dem Fußboden leitfähig verbunden und geerdet sein müssen. Weiterhin bezeichnet sie leitfähige Stoffe als feste oder flüssige Stoffe, deren spezifischer Widerstand nicht mehr als $10^4 \Omega \cdot m$ beträgt. Gleichzeitig ist eine

elektrostatische Erdung bei Gegenständen aus leitfähigen Stoffen gewährleistet, deren Ableitwiderstand gegen Erde nicht größer als $10^6 \Omega$ ist [BGR132]. Feste Stoffe gelten als aufladbar bei einem Oberflächenwiderstand von mehr als $10^9 \Omega$ [BGR132]. Daher ist zu beachten, dass durch eine Kunststoffbeschichtung oder Lackierung keine unzulässige Isolationswirkung entsteht.

Der spezifische Widerstand von Epoxidharzen kann durch die Beimengung von 1,5 % Leitruß auf $10^4 \Omega \text{cm}$ erniedrigt werden, ohne dass eine merkliche Abnahme der mechanischen Eigenschaften zu erkennen ist. Bereits ab 0,9 % bildet sich ein leitfähiges Netzwerk. Wird während der Vernetzung ein elektrisches Feld angelegt, kann dieser Wert auf 0,1 % gesenkt werden [TUHH02].

Bezüglich der Leitfähigkeit sind kohlefaserverstärkte Kunststoffe mit einem Faseranteil ab 40% unabhängig vom Matrixwerkstoff und ohne Zugabe von Füllstoffen zur Erhöhung dieser Leitfähigkeit für den Gebrauch in Krankenhäusern geeignet [MIK01].

Eine elektrische Leitfähigkeit, wie sie bei metallischen Leitern vorliegt, darf insgesamt nicht erreicht werden. Das dient dem Schutz des Patienten vor elektrischem Strom. In der Regel führt eine elektrische Leitfähigkeit auch eine gute Wärmeleitung mit sich, die ebenfalls nicht erwünscht ist. Der elektrische Widerstand für das Liegenelement des Patientenauflegesystems kann daher zwischen 10^4 und $10^6 \Omega$ bei einem Oberflächenwiderstand kleiner $10^9 \Omega$ eingegrenzt werden.

➤ Brandgefahren

Alle verwendeten Elemente müssen schwer entzündlich sein und dürfen keine toxischen Gase unter erhöhter Temperatur freisetzen. Aussagen zur Entflammbarkeit werden u.a. in DIN EN 1865 [DIN99], DIN EN 1021 [DIN94] und DIN 4102 [DIN98] getätigt. In diesen Normen werden auch die Prüfkriterien beschrieben. Als Zündquelle für die Prüfung verwendet die DIN EN 1021 Teil 1 eine glimmende Zigarette. Die Überprüfung des Brandverhaltens ist dabei immer am Endprodukt und nicht an den einzelnen Werkstoffkomponenten durchzuführen [DIN94].

2.9 Werkstoffauswahl

Die Anforderungen, die sich im vorherigen Kapitel bezüglich der Werkstoffe ergeben haben, führen zu so starken Eingrenzungen, dass daraus die notwendige Werkstoffgruppe abgeleitet werden kann. Da für die Werkstoffgruppe eine Reihe von Fertigungsverfahren bekannt sind, kann diese Ableitung unabhängig von der Konzeption bzw. Form des Produktes erfolgen.

Die geforderte geringe Absorption von Röntgenstrahlen bedingt für die verwendeten Werkstoffe eine möglichst niedrige Ordnungszahl. Gleichzeitig muss die Festigkeit des Werkstoffs so hoch wie möglich sein, damit nur ein geringes Volumen mit in Strahlungsrichtung geringer Dicke notwendig ist, um die mechanischen Belastungen aufzunehmen.

Im Periodensystem der Elemente finden sich in der Reihe zwei u.a. die festen Elemente Lithium (Li^3), Beryllium (Be^4), Bor (B^5) und Kohlenstoff (C^6). Es ist bekannt, dass Kohlenstoff und Bor in Form von Fasern, die technisch verfügbar sind, extrem hohe Festigkeitswerte aufweisen. Zur praktischen Anwendung kommen diese Fasern durch die Einbettung in Kunststoffe; es entsteht ein Faser-Kunststoff- Verbund. Die Metalle Lithium und Beryllium erreichen diese Festigkeitswerte bei weitem nicht und sind auch nicht in ausreichender Menge und günstigem Preis verfügbar. Außerdem weisen sie eine hohe Affinität zu Sauerstoff auf, die im Falle einer Oxidation bzw. Verbrennung zu einer sehr starken exothermen Reaktion führt. Für eine geringe Absorption von Röntgenstrahlung bei gleichzeitig hoher Festigkeit erscheinen daher Bor und Kohlenstoff innerhalb eines Faser-Kunststoff- Verbundes besonders geeignet zu sein.

Für das MRT- Verfahren wird der Kernspin von Elementen ungerader Ordnungszahl ausgenutzt, wobei die Anregungsfrequenz in der Regel auf Wasserstoff eingestellt ist. Kohlenstoff (C^6) hat keinen Kernspin und kann daher im Gegensatz zu Bor (B^5) nicht angeregt werden. Das spricht für den Kohlenstoff als geeigneten Werkstoff. Außerdem sind die Kosten von Borfasern gegenüber Kohlenstofffasern etwa 10 mal höher [EHR92, S. 40].

Die Verwendung von Metallen oder Elementen höherer Ordnungszahl erscheint aufgrund der bereits gefundenen Werkstoffe nicht sinnvoll.

In [WOC01] wurde mit Hilfe der Software "Cambridge- Engineering- Selector" [CES00] die Werkstoffgruppe eingegrenzt. Dabei wurden folgende technische Anforderungen berücksichtigt:

- Geringe Dichte
- Hohe Zugfestigkeit
- Hoher E- Modul
- Geringer spezifischer Widerstand zur Vermeidung elektrischer Aufladung
- Beständigkeit gegenüber Desinfektions- und Lösemitteln
- Schwere Entflammbarkeit
- Beständigkeit gegen UV- Strahlen
- Niedrige Ordnungszahl
- Nichtmagnetisch

Als Fertigungsanforderungen wurden beachtet:

- Geeignete Fertigungsverfahren für den Bau eines Prototypen
- Geeignete Fertigungsverfahren für die Serienfertigung
- Möglichst geringe Kosten für Werkstoffe und Verfahren

Die Auswahl führte zur Gruppe der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe. Sie sind anderen Werkstoffen im konkreten Anwendungsfall überlegen, da sie eine niedrige Dichte und hervorragende Röntgentransparenz aufweisen und gleichzeitig eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit besitzen. Dadurch kann bei gegebenen Abmessungen und Belastungszuständen die Materialmenge reduziert werden, die sich beim Röntgen im Strahlengang befindet. Dies gilt gerade für den Bereich der konventionellen (analogen) Röntgentechnik, bei der punktuell die Bildqualität rechnerisch nicht von Artefakten befreit werden kann.

Der Preis der Kohlenstofffasern ist wesentlich höher als der von Glasfasern. Die Verwendung von Glasfasern führt aber aufgrund der höheren Dichte zu einer höheren Absorption der Röntgenstrahlung als bei Kohlenstofffasern. Hinzu kommt, dass die gegenüber Kohlenstofffasern geringere Festigkeit durch mehr Werkstoffeinsatz kompensiert werden muss, was ebenfalls zu erhöhter Absorption führt (vgl. Kap. 3.1.1.1).

2.10 Wirtschaftliche Aspekte

Lebenszyklus-Phase

Lange Wirbelsäulenbretter sind seit ca. 1995 z.B. in den USA weit verbreitet. In Deutschland ist dagegen die Verwendung der Vakuummatratze üblich. Weltweit betrachtet gilt das lange Wirbelsäulenbrett bereits als ausgereift; es sind diverse Ausführungen und Fixationssysteme für Kopf und Körper verfügbar. Ungeachtet des Schutzes durch Patente gibt es dennoch kein am Markt verfügbares Produkt, welches die Erfordernisse nach DIN EN1865 [DIN99] erfüllt und gleichzeitig als System, bestehend aus der Trage und einer Reihe von montierbaren Einzelkomponenten, eingesetzt werden kann. Diese Zusatzkomponenten sind durch keine Norm erfasst. Das begründet sich dadurch, dass das lange Wirbelsäulenbrett „nur“ für die Rettung bis zum Krankenhaus eingesetzt wird, aber nicht für den weiteren innerklinischen Transport und die Diagnose.

Der Systemcharakter des hier erstellten Auflagesystems hat Aspekte eines neuen Produktes. Im Wesentlichen stellt es aber eine Differenzierung / Weiterentwicklung des bestehenden langen Wirbelsäulenbrettes dar.

Eigene Leistungsfähigkeit

Es stehen keine geeigneten Fertigungsmittel zur Verfügung. Deshalb muss entweder ein hohes Maß an Investitionen eingesetzt oder fremdgefertigt werden. Dies ist aufgrund des bestehenden Patentschutzes und der Marktstellung (s. u.) möglich.

Abschätzung künftiger Entwicklungen

Durch den Preisverfall der Kohlenstofffasern auf dem Weltmarkt erschließen sich für diesen Werkstoff neue Anwendungsfelder, die vorher aufgrund der Kosten nicht konkurrenzfähig waren. Gerade im Bereich der Medizintechnik ist ein Zuwachs an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen zu verzeichnen, da hier das Leichtbaupotenzial genutzt wird. Die Entwicklung der DIN EN 1865 in Europa (vgl. Kap. 2.3.1) und die weit verbreitete Anwendung des langen Wirbelsäulenbrettes in den USA kann zukünftig auch zu einer vermehrten Anwendung dieses Rettungsmittels in Europa führen. Die Röntgendurchstrahlbarkeit ist nach Norm vorgegeben, wobei aber keine Aussage bezüglich der maximal zulässigen

Absorption erfolgt. Aus diesem Grund werden statt Kohlenstofffasern die preisgünstigen Glasfasern zur Verstärkung eingesetzt. Es ergibt sich damit mehr Material im Strahlengang als es technisch nötig wäre. Diese Entwicklung ist dann richtig, wenn das lange Wirbelsäulenbrett nur als preislich günstiges Rettungsmittel dient, auf dem in seltenen Fällen auch ein Röntgenbild des Patienten angefertigt wird. Bei der steten Anwendung des Röntgenverfahrens muss aber eine optimale Röntgenkompatibilität vorhanden sein. Dies kann das lange Wirbelsäulenbrett nicht gewährleisten. Untersuchungen zur Absorption von Wirbelsäulenbrettern finden sich in [LIN01].

Herstellkosten, Kosten je Einsatz und Lebensdauer

Die Herstellkosten für das Liegenelement, gefertigt in werkstofftechnisch hochwertiger Ausführung aus CFK (vgl. Kap. 3.1.1.1) in mittlerer Serie, müssen in einem Kostenrahmen unter 1000 EUR bleiben. Varianten, die als Rettungsmittel eingesetzt werden, müssen sich preislich in die Reihe der Wettbewerbsprodukte einreihen, bei denen der Verkaufspreis zwischen 100 bis 500 EUR liegt. Erfolgt aufbauend auf der Langlebigkeit des Patientenauflegesystems eine Umrechnung der Anschaffungskosten je Patientenlagerungsvorgang, so ergibt sich ein Wert von unter einem Euro. Gegenüber den Kosten, die durch die gesamte Behandlungszeit entstehen, sowie gegenüber dem entstandenen Sicherheitsgewinn und dem Zeitvorteil in der Behandlungskette, der wiederum zu Kosteneinsparungen führt, ist dies ein zu vernachlässigender Faktor.

Produkt-Markt-Matrix und strategische Freiräume


	Derzeitige Märkte	Neue Märkte
Derzeitige Produkte		
Neue Produkte		

Abb. 2-19: Produkt- Markt- Matrix für das Patientenauflegesystem (Matrix nach [PAHL97, S. 157])

Die Produkt-Markt-Matrix in **Abb. 2-19** stellt dar, in welchen Märkten das Produkt bezüglich der Marktpositionierung des entwickelnden Unternehmens eingesetzt wird und wie sich das Produkt zum Produktprogramm des Unternehmens verhält.

Das Patientenauflegesystem ist für einen Tomographie- Geräte- Hersteller ein neues Produkt, da Wirbelsäulenbretter augenblicklich nicht standardmäßig in Tomographie- Geräten angewendet werden. Da das Patientenauflegesystem aber eine Verbesserung der Arbeitsabläufe bei der Tomographie- Diagnose bewirkt, ist es überwiegend im derzeitigen Markt eines Tomographie- Geräte- Herstellers anzusiedeln. Der Aspekt des neuen Marktes ist in dem Verlassen des Diagnosegerätebereiches hin zum Rettungsmittelmarkt zu sehen, dieser Bereich stellt aber nur eine weitere Möglichkeit dar, die nicht zwingend realisiert werden muss. Hier sind bereits eine Vielzahl von Wettbewerbern am Markt vertreten, die ausgereifte Produkte anbieten. Den größten Vorteil der optimalen Röntgenkompatibilität kann das neue Produkt in diesem Bereich nicht nutzen, auch ein deutlicher Gewichtsvorteil ist nicht zu erwarten. Einzige Neuerung sind die weiteren Anbauteile, die bei den bestehenden langen Wirbelsäulenbrettern am Markt nicht angeboten werden, da der Systemcharakter hier nicht angewendet wird. Versorgungsgeräte oder -elemente werden als separate Einheiten mitgeführt oder an der Haupttrage befestigt. Die Integration in diesen Bereich stellt daher ein sehr hohes Risiko dar. Günstig erscheint bei mittlerem Risiko nur die Eingliederung in den derzeitigen Markt der innerklinischen Diagnose mit Röntgen- bzw. Tomographieverfahren. Innerhalb des Krankenhauses ist außerdem die Langlebigkeit des Produktes und die volle Ausnutzung der Funktion gewährleistet. Das Risiko von den am Markt vorhandenen Wettbewerbern preislich unterboten bzw. mit den Stückzahlen übertroffen zu werden, kann durch das bestehende Patent und die spezielle Anpassung an die Gegebenheiten der eigenen Diagnosegeräte vermindert werden. Das Risiko für einen Wettbewerber, in diesen Bereich einzudringen, erscheint deshalb zu hoch.

Der Marktanteil eines Tomographie- Geräte- Herstellers kann dadurch gestärkt werden, dass das Patientenauflegesystem als zusätzlicher Anreiz zur Erwerbung eines Diagnosegerätes dient bzw. die Funktion des Gerätes in bestimmten Anwendungsfällen verbessert. Außerdem ist eine Differenzierung zum Wettbewerb gegeben, da das neue Element in bestehende Abläufe integriert

werden kann, ohne dass weitere Elemente hinzugefügt oder geändert werden müssen. Dennoch ist es möglich, dass Wettbewerber auch mit neuen Produkten oder Produktvarianten am Markt auftreten können. Die eigenen Entwicklungskosten sollten so niedrig sein, dass sie auf eine Stückzahl von 500 umgelegt werden können, wobei eine frühe Markteinführung zusätzliche Vorteile zur Erzielung von anfangs hohen Preisen bietet [WISS03].

Im Bereich der Unternehmensstärken stellt das Produkt eine gute Sortimentserweiterung dar, wobei nur ein geringer interner Investitionsbedarf notwendig ist. Die Produktion kann über Fremdfertigung erfolgen. Die angestrebten Stückzahlen führen dabei allerdings zu einem Serienfertigungsverfahren, für das mittlere Anfangsinvestitionen notwendig sind. Für die Markteinführung kann zunächst mit einem lohnintensiven Fertigungsverfahren mit geringen Anfangsinvestitionen begonnen werden. Stellt sich der gewünschte Markterfolg ein, kann die nächste Stufe der Serienfertigung erfolgen. Die Fremdvergabe der Fertigung ermöglicht stets kalkulierbare Kosten.

Stückzahlen

Für die Auswahl und Optimierung der Fertigungsverfahren muss eine Abschätzung der Stückzahlen erfolgen.

Ein Patientenauflegesystem, welches in die Prozessketten *Rettung* und *innerklinischer Transport* eingegliedert werden kann, muss stets in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehen.

Im Bereich der externen Rettung muss je Krankentransportwagen ein System vorhanden sein. Erfolgt die Übergabe des Patienten im Krankenhaus, muss der Krankenwagen im Tausch mit einem neuen System ausgerüstet werden. In jedem Krankenhaus ist daher eine Anzahl vorzusehen, die höher ist als die Menge an Notfallpatienten, die maximal pro Tag eingeliefert werden, damit auch die Reinigung (und Trocknung) der Systeme gewährleistet ist.

Für den innerklinischen Transport kann über die maximal möglichen Transportziele, wie z.B. die Anzahl der internen CT- und MRT- Geräte, eine Anzahl festgelegt werden. Beachtet werden muss dabei, dass ein Patient zunächst in der Station auf einen Transport vorzubereiten ist. Die Anzahl der Patientenauflegesysteme sollte daher so groß gewählt werden, dass zeitgleich Patienten

vorbereitet und behandelt werden können sowie eine Reinigung des Systems erfolgen kann. Daraus resultiert eine Anzahl von drei Systemen für jeden möglichen Bereich, wobei mindestens die zwei Bereiche *Schockraum* und *Intensivstation* berücksichtigt werden müssen. Nach [BRU03] waren im Jahre 1997 schon 792 CT- Geräte und 268 MRT- Geräte in deutschen Krankenhäusern installiert. Die Mindestanzahl der Systeme ergibt sich damit bei Flächendeckung etwa zu 6400 Systemen. Da sich die Krankenhäuser stark in Größe und Ausrüstung unterscheiden, kann als Abschätzung angenommen werden, dass je Krankenhaus durchschnittlich maximal etwa 10 Systeme eingesetzt werden können. Bei ca. 2240 Krankenhäusern in Deutschland (Deutsche Krankenhaus-Gesellschaft [DKG03]) und etwa 15000 in Europa [DKVG01] ergibt dies eine Stückzahl von 22400 Systemen in Deutschland und 150000 in Europa. Unter Berücksichtigung der begrenzten Lebensdauer von etwa 10 Jahren ist bei Flächendeckung mit einem durchschnittlichen Marktvolumen pro Jahr von 2240 Stück in Deutschland bzw. 15000 Stück europaweit zu rechnen.

3 Grundlagen der Kunststoff- Verbund- Systeme

Die Werkstoff- Anforderungen, die sich aus Kap. 2.8 ergeben, führen in Kap. 2.9 zur Auswahl von Faser- Kunststoff- Verbund- Werkstoffen als ideale Werkstoffgruppe. Insbesondere die Verwendung von Kohlefasern ist für den vorliegenden Anwendungsfall besonders günstig (vgl. Kap. 2.9). Da der Aufbau, die Eigenschaften und die Fertigungsverfahren von FKV- Werkstoffen elementar für alle späteren Konzepte und Berechnungen sind, erfolgt nun ihre ausführliche Vorstellung.

3.1 Werkstoffe

Der Grund für die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe liegt in der Erreichbarkeit besserer Eigenschaften, die die Werkstoffe einzeln nicht besitzen. Bei Faser- Kunststoff- Verbund- Werkstoffen entsteht durch den Verbund insbesondere für die Werkstofffestigkeit eine Verbesserung.

Ein Kunststoff- Verbund- System besteht aus den Elementen Matrix, Füllstoff und Additiven [JAN89]. Die Matrix bildet den Grundwerkstoff, in dem die Füllstoffe und die Additive eingebettet sind. Die Füllstoffe verbessern die mechanischen Eigenschaften. Die Additive beeinflussen andere Materialparameter wie [MIC92, S. 68]:

- Lichtbeständigkeit (UV-Licht)
- Erzeugung bestimmter Produktcharakteristika (Farbpigmente)
- Beständigkeit gegen Flammeinwirkung
- Elektrische Leitfähigkeit

Der Werkstoff entsteht im Gegensatz zu den meisten klassischen Konstruktionswerkstoffen erst, wenn das zu produzierende Werkstück in seiner grundlegenden Form gefertigt wird und sich Matrix und Füllstoff miteinander

verbinden. Entscheidend für die Qualität der Verbindung ist eine gute Haftung in der Grenzfläche [Ehr92, S. 82] und eine vollständige, blasenfreie Benetzung der Kontaktflächen.

3.1.1 Füllstoffe

Als Füllstoff können die festen Bestandteile bezeichnet werden, die in der formgebenden Matrix eingebettet sind und zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere E- Modul und Zugfestigkeit, beitragen. Sie können in Teilchen-, Platten-, Folien- oder Faserform vorliegen.

Alle Füllstoffformen bewirken eine mehr oder weniger ausgeprägte Erhöhung der Steifigkeit und damit des E- Moduls. Eine Zugfestigkeitserhöhung ist allerdings nur durch die Verwendung von Fasern erreichbar [Ehr92, S. 71]. Deshalb erfolgt nun deren nähere Betrachtung. Da Fasern aus unterschiedlichsten Werkstoffen bestehen können, die wiederum differenzierte Eigenschaften, Abmessungen und Lieferformen aufweisen, wird zunächst auf die möglichen Werkstoffe und anschließend auf die räumlichen Anordnungsmöglichkeiten der Fasern mit den technisch gebräuchlichsten Lieferformen eingegangen.

3.1.1.1 Faserwerkstoffe

Im technischen Gebrauch sind eine Reihe von Faserwerkstoffen, eine grundlegenden Übersicht der Eigenschaften zeigt **Abb. 3-1**.

Die Durchmesser der handelsüblichen technischen Fasern liegen überwiegend im Bereich zwischen 5 und 25 μm . Kleinere Durchmesser werden wegen der Möglichkeit der Lungengängigkeit und der damit verbundenen Krebsgefahr praktisch nicht eingesetzt. Größere Durchmesser bedeuten meistens geringere Festigkeit und schlechtere Drapierbarkeit [EHR92, S. 9/11].

Die gebräuchlichsten Fasern sind die Glas-, Aramid- und Kohlenstofffasern, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Die Eigenschaften der Kohlenstofffasern werden dabei ausführlicher betrachtet.

Fasertyp	Dichte	E-Modul	Zug- festigkeit	Bruch- dehnung	spez. Festigkeit (Reißlänge)	spez. E- Modul (Dehnlänge)	Durch- messer	max. Einsatz- temperatur
Einheit	g/cm ³	N/mm ²	N/mm ²	%	$\sigma/\rho?$ km	E/ ρ km	μm	°C
E-Glas	2,5-2,6	69000-72000	1700-3500	3	118	27600	5-25	350
S-Glas	2,48	85000	4800	5,3	194	24300	5-15	300
Bor	2,4-2,6	365000-440000	2300-2800	1	88-108	14000-19100	33-140	2000
Kohle HM	1,96	517000	1860	0,38	95	16400	4-8	600
Kohle HS	1,8	295000	5600	1,8	311	16400	5,5	500
Al ₂ O ₃ Du Pont	3,95	379000	1380-2100	0,4	46	9600	20	1000
Nicalon SiC	2,8	450000-480000	300-4900	0,6	47	2600	10-12	1300
Avco SiC	2,7-3,3	427000	3400-4000	1	110	11600	140	
Nylon 66	1,2	<5000	1000	20	80	410	25	150
Polyester	1,38	<18000	800	15	60	1300	25	150
Kevlar 49 (Aramid)	1,45	135000	3000	8,1	210	9300	12	250
Technora HM50 (Aramid)	1,39	75000	3000	4,3	210	5400	12	250
Spectra 900 (hochfestes Polyethylen)	0,97	117000	3000	3,5	310	12000	38	120

Abb. 3-1: Eigenschaften handelsüblicher technischer Fasern [FLE95, S. 48]

Glasfasern

Glas wird bei Temperaturen um 1400 °C aus Quarzsand (SiO₂), Kalkstein (CaCO₃), Kaolin (Al₄[OH₈Si₄O₁₀]) u. a. erschmolzen und aufbereitet. Die Weiterverarbeitung zu 2 mm dicken Fäden erfolgt über Spinndüsen, die anschließend im noch zähflüssigen Zustand zu Fasern im Bereich von 10 μm gestreckt werden [EHR92, S. 23].

Die Struktur von Glas ist amorph, d.h. regellos. Die hohen Werte für Festigkeit und E- Modul ergeben sich aus den starken kovalenten Bindungen zwischen Silizium und Sauerstoff im dreidimensionalen Netzwerk des Glases und sind auch bei Fasern isotrop, d.h. in allen Raumrichtungen gleich [EHR92, S. 22].

Aramidfasern

Aramid ist der Oberbegriff für alle aromatischen Polyamide und gehört zur Gruppe der organischen Hochleistungschemiefasern. Für die Herstellung wird zunächst aromatisches Aramid in einem Lösungsmittel aufgelöst. Anschließend wird dieses versponnen und verstreckt. Dadurch orientieren sich die Molekülketten in Faserrichtung und bilden kristalline Strukturen mit hoher Packungsdichte. Es entsteht eine starke Anisotropie⁶, da nur in Längsrichtung herausragende Zugfestigkeiten erreicht werden können. Die Aramidfaser gibt es in unterschiedlichen Typen, die sich geringfügig in der Zugfestigkeit (3400-3800 N/mm²), aber stark in E- Modul und Bruchdehnung unterscheiden (vgl. Abb. 3-1). Fasern mit hoher Bruchdehnung und niedrigem E- Modul haben die Bezeichnung HE für *High Energy*, d.h. hohem Arbeitsaufnahmevermögen. Fasern mit geringerer Bruchdehnung und hohem E- Modul sind auf hohe Steifigkeit optimiert und haben die Bezeichnung HM für *High Modulus*.

Zusammenfassung der Eigenschaften von Aramidfasern [EHR92, S. 30f]:

- Geringste Dichte der Verstärkungsfasern von $\rho=1,45 \text{ g/cm}^3$
- Hohes Feuchtigkeitsaufnahmevermögen, was zur Haftungsverminderung führt
- Festigkeitsabfall durch Einwirkung energiereicher Strahlung wie z.B. UV- Licht
- Bauteile aus aramidfaserverstärktem Kunststoff lassen sich schlecht spanend bearbeiten.
- Starke Anisotropie: $E_{\perp F} \ll E_{\parallel F}$, $R_{m\perp F} \ll R_{m\parallel F}$.
- Geringe Druckfestigkeit in Faserrichtung, ungeeignet für Bauteile unter Biege- oder Druckbeanspruchung

⁶ Anisotropie: Richtungsabhängigkeit

Kohlenstofffasern

Kohlenstoff kann in zwei Strukturen vorkommen, Graphit und Diamant. Technische Kohlenstofffasern besitzen eine Graphitstruktur, die zu annähernd 100 % parakristallisiert ist und einen sehr hohen Orientierungsgrad aufweist. Es ergeben sich daher innerhalb der Faser nebeneinander liegende Graphitkristallschichten, deren Schichtorientierungen entlang der Faser verlaufen.

Innerhalb der Schicht besteht zwischen den einzelnen Atomen eine sehr starke kovalente Bindung, zwischen den Schichten bestehen nur schwache van der Waals-Bindungen. Hieraus resultiert, dass die mechanischen Eigenschaften entlang der Faser sehr hohe Werte annehmen, quer zur Faser aber nur sehr niedrige.

Für die Herstellung der Fasern gibt es zwei Verfahren: die Produktion über Polyacrylnitril-Fasern (PAN) oder über Steinkohlenteerpech. Das bis heute günstigere und technisch ausgereifere Verfahren ist das auf PAN-Faser-Basis. Die Prozessschritte unter Verwendung des prinzipiell günstigeren Ausgangsproduktes Pech sind bis heute schwer beherrschbar und kostenintensiver, aber weiterhin vielversprechend, da Fasern auf Pechbasis teilweise bessere Eigenschaften als Fasern auf PAN-Basis erreichen können [FLE95, S. 9-19].

Auf Basis von PAN erfolgt heute die Unterscheidung in vier Gruppen [FLE95, S. 9-19]:

➤ Hochfeste Fasern: High-Tensile, HT

Stellt bis heute etwa 90 % des Faserverbrauchs, Nachteil: geringer E-Modul

➤ Hochsteife Fasern: High-Modulus, HM

Nachteil: geringe Bruchdehnung

➤ Intermediate-Modul-Fasern: IM

Weiterentwicklung der HT-Fasern zu deutlich höheren Zugfestigkeiten und etwas höheren E-Moduln und Bruchdehnungen

➤ Hochmodul / Hochfestigkeitsfasern: High-Modulus / High-Strength, HMS

Weiterentwicklung der HM-Fasern hin zu höheren Zugfestigkeiten und Dehnungen bei gleichzeitiger Erhöhung des E-Moduls

Eine Übersicht über die physikalischen Eigenschaften der Standard-Fasern zeigt **Abb. 3-2**.

Kohlenstofffasern weisen entlang der Faser einen sehr kleinen und zwar negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $\alpha_{TII F} \approx -0,1$ bis $-0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [RUG02, S. 157] auf. Dadurch neigen Bauteile aus CFK kaum zur Wärme- dehnung; das ist z.B. für die Verwendung in der Messtechnik ein wichtiger Aspekt.

Physikalische Eigenschaft			Kohlenstofffasern auf PAN- Basis			
			Hochfest	Inter- mediate	Hochsteif	Hochsteif, Hochfest
Einheit			HAT	IM	HM	HMS
Dichte	ρ	g/cm ³	1,74	1,80	1,83	1,85
Zugfestigkeit	σ_{Bz}	N/mm ²	3600	5600	2300	3600
Zugmodul	E_z	N/mm ²	240000	290000	400000	550000
Druckfestigkeit	σ_{Bd}	N/mm ²	2500	4200	1500	1800
Bruchdehnung	ε_{Bz}	%	1,50	1,93	0,57	0,65
Reißlänge	σ_{Bz}/ρ	km	206	311	125	194
Dehnlänge	E_z/ρ	km	13800	16100	21850	29730
Faserdurch- messer	d	μm	~7	~5	~6,5	~5

Abb. 3-2: Kennwerte von Standard- Kohlenstofffasern auf PAN- Basis [FLE95, S. 13]

Neuere Entwicklungen auf Pech- Basis haben gezeigt, dass insbesondere der E- Modul bis auf Werte um $9 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ weiter steigerbar ist. Dieser Wert liegt sehr dicht an dem theoretischen Wert von $1,05 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ des Graphit- Einkristalls, er wird allerdings mit höheren Produktionskosten erkaufte. Die theoretische Zugfestigkeit des Graphit- Einkristalls liegt etwa bei 1/10 des E- Moduls, dieser Wert wird bis heute von technischen Fasern bei weitem nicht erreicht [FLE95, S. 30].

Durch den Trend HT- oder IM-Fasern kostengünstiger herzustellen, erschließen sich neue Einsatzgebiete, z.B. im Automobilbau, Hochbau, Maschinenbau, in der Medizintechnik und im Freizeitsportbereich [FLE95, S. 30].

3.1.1.2 Faserhalbzeuge

Nach [EHR92, S. 21] sind Fasern „stabförmige Körper, meist mit Kreisquerschnitt und mit einem sehr großen Verhältnis von Länge / Dicke“. Durch dieses Verhältnis steigt im Allgemeinen auch die Festigkeit. Dies begründet sich im Fall der Variation der Länge damit, dass eine gewisse Oberfläche der Faser zur Verfügung stehen muss, damit auf diese so viel Kraft übertragen werden kann, dass sie reißt. Variiert der Faserdurchmesser, leitet sich die Festigkeitserhöhung aus dem Paradoxon nach A.A. Griffith ab [EHR92, S. 9]. Für Hochleistungsverbundstrukturen werden daher Endlosfasern eingesetzt.

Bei der Verwendung von Fasern ist es möglich, verschiedene Faserlängen und -durchmesser einzusetzen. Es wird unterschieden zwischen Kurz- und Lang- bzw. Endlosfasern, die gerichtet oder ungerichtet in der Matrix eingebettet sein können. Die Fasern werden als Endlosfasern, die als Filamente bezeichnet werden, mit je nach Werkstoff festgelegtem Faserdurchmesser hergestellt. Daher wird die Änderung des Verhältnisses von Länge zu Durchmesser nur durch einen Zuschnitt der Endlosfasern auf eine bestimmte Länge erreicht.

Kurzfasern besitzen eine Länge im Bereich von unter 1 mm bis wenigen mm und werden häufig in Spritzgussformmassen verwendet [FLE96, S. 50].

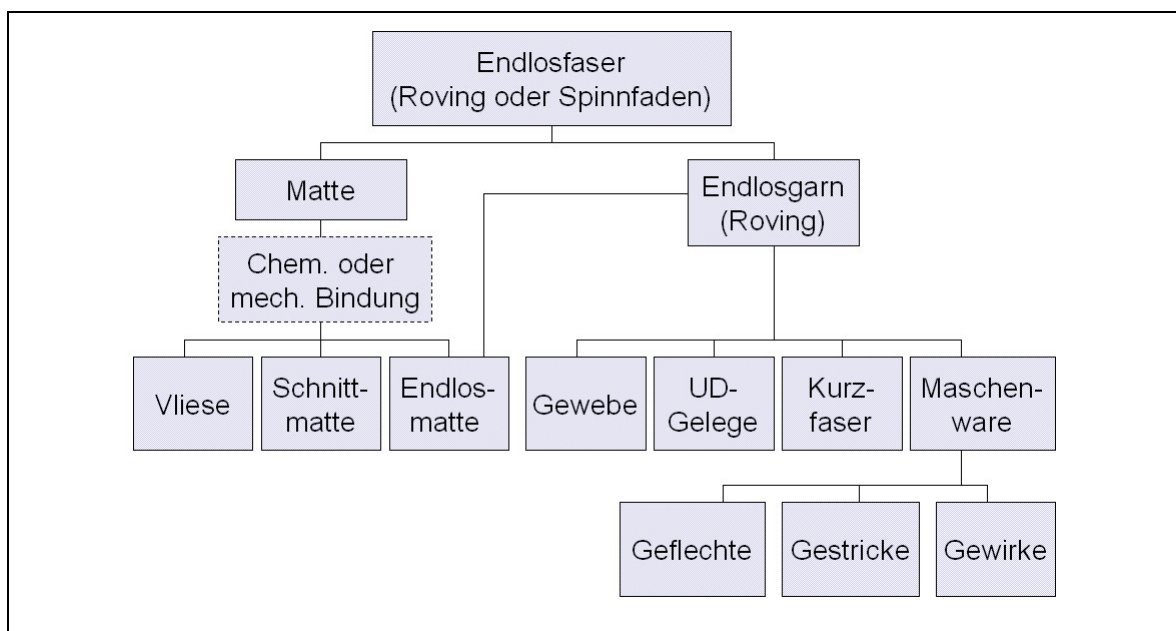


Abb. 3-3: Lieferformen von Textilglaserzeugnissen [EHR92, S. 24]

Langfasern haben eine Länge im Zentimeter- Bereich. Für Glasfasern mit einem Durchmesser von 10 μm ergibt sich beispielsweise eine Mindestlänge von 10 mm [EHR92, S. 21].

Aus den Endlosfasern werden für den industriellen Einsatz alle Lieferformen gefertigt, **Abb. 3-3**. In eindimensionaler Form kann eine größere Anzahl einzelner Filamente zu sogenannten Rovings⁷ zusammengefasst werden. Die Bezeichnung der Rovings erfolgt entweder über das *Rovinggewicht* in *tex*, was 1 g pro km (10^{-5} N/m) entspricht, oder über die sogenannte *K- Zahl*, die der Anzahl der Filamente je Roving in Vielfachen von 1000 angibt. Bei einem Rovinggewicht von 1610 tex, einem Filamentdurchmesser von ungefähr 7 μm und einer Dichte von 1,8 g/cm³ für Kohlenstoff ergibt dies beispielsweise eine K- Zahl von 6 (5,81). Übliche K- Zahlen liegen für Kohlenstoffrovings bei 1,3,6, 12 und evtl. 24 [FLE96, S. 48].

3.1.1.3 Ungerichtete flächige Halbzeuge

Nach [FLE96, S. 51-52] werden ungerichtete flächige Halbzeuge aus mechanisch oder chemisch gebundenen Matten hergestellt.

Schnittmatten bestehen aus geschnittenen, regellos abgelegten Spinnfäden oder Rovings mit einer Länge zwischen 25 mm und 30 mm, die miteinander über Bindemittel verklebt oder mechanisch versteppt sind. Die filzartige Schnittmatte kann auf Rollen aufgewickelt werden.

Vliese sind nichtgewebte Flächengebilde mit geringer Flächenmasse⁸. Die Fasern können statistisch wirr oder prozentual gerichtet angeordnet sein, werden über Bindemittel zusammengehalten und haben eine größere Länge als bei Schnittmatten. Sie werden u. a. für die Deckschicht von Faser- Kunststoff- Verbund- Bauteilen verwendet, um eine gleichmäßig glatte Oberfläche ohne Struktur zu ermöglichen.

⁷ Roving, engl.: Das Vorgarn

⁸ Flächenmasse: Gewicht des Faserhalbzeuges bezogen auf eine Fläche von 1 m², z.B. 204 g/m²

Endlosmatten bestehen aus nicht geschnittenen endlosen Spinnfäden, die regellos ohne Vorzugsrichtung in mehreren Lagen verlegt und durch Bindemittel zusammengehalten werden. Die Verformbarkeit ist besser als bei Schnittmatten.

3.1.1.4 Gerichtete flächige Halbzeuge

Im Gegensatz zu den ungerichteten Matten, die nur senkrecht zur Ablegeebene anisotrop sind, weisen gerichtete flächige Halbzeuge auch innerhalb der Ablegeebene ein anisotropes mechanisches Verhalten auf. Die Fasern können in unterschiedlichen Orientierungen, Stärken, Längen und Anordnungen abgelegt, gewebt oder geflochten werden.

Eine einfache Anordnung bezüglich einer einzigen Orientierung stellt das gerichtete Kurzfasergelege dar, das als flaches Band aus einer nicht wässrigen Suspension von Kurzfasern hoher Orientierung u. a. auf modifizierten Papiermaschinen hergestellt wird. Eingebettet in der Matrix kann dadurch ein hohes Verstärkungsmaß erreicht werden. Beim Vergleich von CFKV mit Kurzfasergelegen gegenüber CFKV mit Langfasergelegen im Zugversuch ist nur eine Festigkeitsabnahme von 20% und eine E- Modulabnahme von ~10 % zu verzeichnen [FLE94, S. 127]. Der große Vorteil von Halbzeugen bei Verwendung von gerichteten Kurzfasern besteht darin, dass diese gut verformbar sind, da die Kurzfasern während der Verformung aneinander abgleiten können [FLE96, S. 54].

Bei unidirektionalen Fasergelegen bestehen die Bänder aus parallel angeordneten endlosen Rovings, die über ein Haftfadengitter oder dünne Klebevliese zusammengehalten werden. Durch das UD- Gelege werden die Eigenschaften der Fasern optimal ausgenutzt, da diese parallel nebeneinander liegen und entlang der angreifenden Kraft ausgerichtet werden können [FLE96, S. 54].

Fasergewebe werden in der Regel aus sich rechtwinklig kreuzenden Rovings, den Kett- und Schussfäden, hergestellt. Es entsteht dadurch ein flächiges Halbzeug, das zwei Verstärkungsrichtungen (Biaxialität) aufweist. Während des Webprozesses kann der Kettfaden unterschiedlich angehoben werden, wodurch verschiedene Bindungsarten entstehen. Diese unterscheiden sich erheblich in ihrer Drapierbarkeit auf komplexen Oberflächen und in ihren mechanischen Eigenschaften untereinander sowie in Bezug auf UD- Gelege. Durch die Über-

kreuzung verformen sich die Rovings wellenförmig, was zu einer Erniedrigung der Bauteilfestigkeit und -steifigkeit gegenüber der Verwendung von UD-Gelegen führt, **Abb. 3-4**.

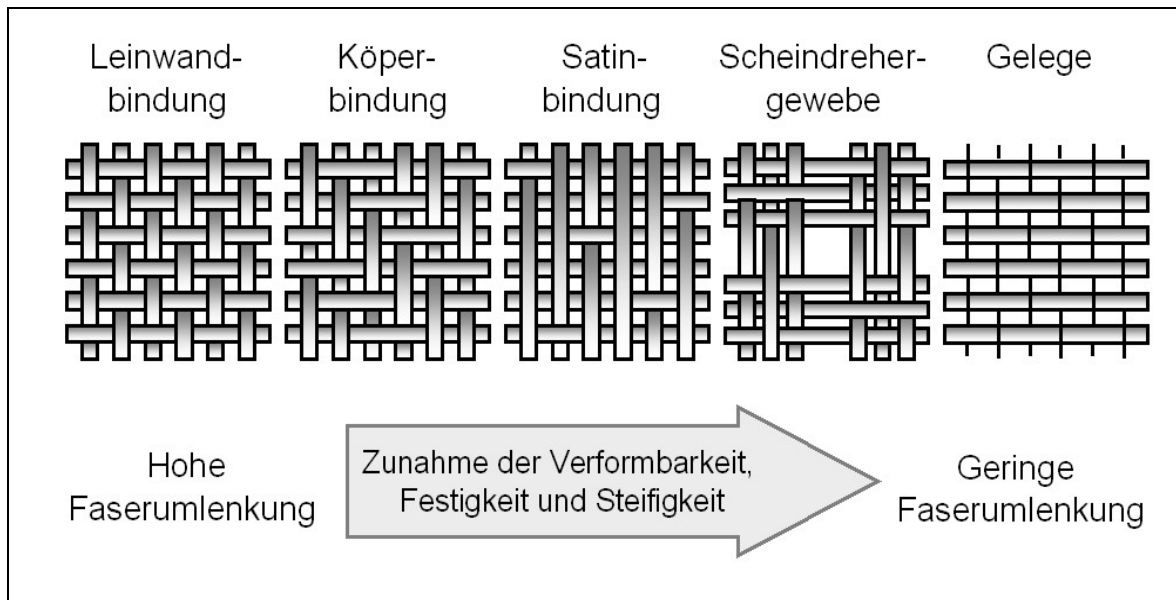


Abb. 3-4: Übersicht über technisch häufig verwendete Gewebetypen

Unter Zugbeanspruchung entstehen in den Kreuzungspunkten u. a. zusätzliche Druckspannungen quer zur Faser. Unter Druckbeanspruchung kann ein Kreuzungspunkt das Ausknicken des Rovings begünstigen, wodurch es punktuell zur Trennung zwischen Faser und Matrix, der Delamination, kommen kann [PUC96, S. 96-99].

Die biaxiale Anordnung begründet sich aus den am Bauteil angreifenden Hauptspannungen, die senkrecht aufeinander stehen. So kann entsprechend der zu erwartenden Kräfte in den Hauptrichtungen gezielt verstärkt werden. Dadurch wird der Werkstoff hervorragend ausgenutzt. Es kommen aber auch triaxiale Gewebe vor, bei denen die Hauptrichtungen z.B. in einem Winkel von 60° zueinander stehen. Dadurch wird ein quasiisotroper Zustand in der Ebene erreicht, der aber mit geringerer Werkstoffausnutzung verbunden ist. Weder die Zugfestigkeit noch der E-Modul sind besonders hoch. Diese Typen werden verwendet, wenn die Richtung der Kraft nicht konstant ist, sondern wechselt oder eine besondere Schubsteifigkeit gefordert ist [FLE96, S. 63]. Für Torsionssteifigkeit bietet sich z.B. ein $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ -Gewebe an. Weitere Eigenschaften der

triaxialen Gewebe sind die gute Drapier- und Handhabbarkeit und der geringere Verschnitt bei Winkelzuschnitten.

3.1.2 Polymere Matrixsysteme

Die Matrix hat folgende grundlegende Aufgaben:

- Übertragung der eingeleiteten Kräfte auf die Fasern bzw. zwischen den Fasern
- Schutz der Faser gegen Beschädigung oder vor Umwelteinflüssen
- Sicherung der äußeren Gestalt, Halten der Faser in der gewünschten Form und Stützen der Faser bei Druckbelastung gegen Einknicken

Allgemein ist zwischen Duromeren und Thermoplasten (und Elastomeren) zu differenzieren. Diese unterscheiden sich grundsätzlich in ihren chemischen Bindungsenergien.

Thermoplaste haben innerhalb der Molekülkette Primärbindungen und zwischen den Ketten nur ca. 100 mal schwächere Sekundärkräfte. Thermoplaste erweichen bei höheren Temperaturen, da die Sekundärbindungen aufbrechen, und sind dann nahezu beliebig ur- oder umformbar. Bei Abkühlung erstarren die Moleküle wieder zu einem festen Körper. Dieser Prozess ist nahezu beliebig oft wiederholbar, was eine günstige Eigenschaft in Bezug auf die Verarbeitung von Halbzeugen oder auch des Recycling darstellt. Die Moleküle von Thermoplasten können amorph, d.h. regellos verteilt oder in teilkristalliner Form aus der Schmelze erstarren. Bei teilkristalliner Struktur besitzen die Molekülketten in einzelnen Bereichen die gleiche Orientierung und liegen dicht nebeneinander. Das führt zu besseren mechanischen Eigenschaften wie E- Modul und Zugfestigkeit, verringert aber auch die Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit.

Duromere bilden ein dreidimensionales Netzwerk aus Raumnetzwerk-molekülen, die über Primärbindungen verbunden sind. Nach der Vernetzungsreaktion ist ein erneutes Aufschmelzen und Formgeben nicht mehr möglich. Erhöhte Temperaturen bewirken lediglich eine Erweichung und bei weiterer Steigerung eine Zersetzung der Moleküle.

3.1.2.1 Duromere Matrixsysteme

Duromere Matrixsysteme tragen im Allgemeinen auch die Bezeichnung *Harze* und entstehen aus einer chemischen Reaktion von Präpolymeren. Dabei gibt es drei grundsätzliche Vernetzungsreaktionen [FLE95, S. 181]:

- Polyaddition
- Polymerisation
- Polykondensation

Für Faser- Kunststoff- Verbünde werden nahezu ausschließlich Polymerisations- und Polyadditionsharze verwendet. Polykondensationsharze setzen bei der chemischen Reaktion Spaltprodukte frei, wodurch bei druckloser Verarbeitung Fehlstellen in der Matrix entstehen, die zur deutlichen Schwächung des Verbundes führen. Eigenschaften von einer Auswahl duromerer Matrixsysteme zeigt **Abb. 3-5**.

Physikalische Eigenschaft		Duromere Matrix		
	Einheit	UP ungesättigtes Polyesterharz	VE Vinylesterharz	EP Epoxidharz
Dichte ρ	g/cm ³	1,2-1,3	1,12	1,1-1,14
Zugfestigkeit R	N/mm ²	40-70	83	30-100
Zugmodul E	N/mm ²	3000-4200	3440	3000-6000
Ausdehnungs- koeffizient α_T	10 ⁻⁶ /K	80-150	65	60
Glasübergangs- temperatur ⁹	°C	70-120	-	50-300
Bruchdehnung	%	2-10	5	1,7-2

Abb. 3-5: Eigenschaften duromerer Matrixsysteme [MOS92, S. 46-48]

Es folgt die Vorstellung der UP- und EP- Harzsysteme, die in der Praxis sehr häufig Verwendung finden.

Ungesättigte Polyesterharze (UP- Harze)

UP- Harze werden bei Raumtemperatur oder unter Wärmezufuhr, drucklos oder bei verhältnismäßig niedrigem Druck verarbeitet, wobei sie bei der Verarbeitung zwischen 6% bis 10% schwinden. Für die Härtung (Polymerisation) haben sich in der Praxis zwei Systeme bewährt, die Ketonperoxide mit Kobaltbeschleunigern und das Benzoylperoxid mit Amin-Beschleunigern, die beide in Gewichtsanteilen zwischen 2% und 4 % bezogen auf die verwendete Harzmenge beigegeben werden. Die mechanischen Eigenschaften sind gut bis befriedigend und sie vergilben bei Einwirkung von UV-Licht. Daher werden sie selten für hochbeanspruchte Bauteile verwendet [EHR92, S. 44-48], vgl. Abb. 3-5.

UP- Harze sind u. a. für die Urformherstellung (vgl. Kap. 3.4) oder im Bootsbau einsetzbar und finden eingefärbt Verwendung als Top Coat¹⁰ bei Segelflugzeugen.

Epoxidharze

Epoxidharze sind bei Raumtemperatur flüssig bis fest und haben eine leicht gelbliche bis dunkelbraune Farbe. Die Härtung erfolgt über eine Polyadditionsreaktion zwischen dem Epoxidharz und dem Härter. Da der Härter ein Reaktionspartner und kein Katalysator ist, muss das Verhältnis der Mischung exakt eingehalten werden, um optimale Eigenschaften zu erzielen und Fehlhärtungen zu vermeiden. Während der Reaktion wird Wärme frei, die bei großen Wandstärken zum Wärmestau und damit zur Überhitzung führen kann.

Die meisten (kalthärtenden) Systeme härten bei Raumtemperatur innerhalb von 24 Stunden aus. Je nach Harzsystem kann eine vollständige Härtung bei Raumtemperatur aber nicht erreicht werden. Daher muss mehrstündig bei Temperaturen zwischen 60 und 100 °C nachgehärtet werden. Häufig gilt dies für Systeme, die im Flugzeugbau verwendet werden, wo höchste Anforderungen gelten. Diesem Nachteil steht aber der Vorteil der langen Verarbeitungszeit (Topfzeit) von bis zu 210 min gegenüber, so dass komplex aufgebaute Bauteile in

⁹ Glasübergangstemperatur bei Duomeren: Erweichungstemperatur, E_z und σ_{Bz} nehmen ab, eine weitere Temperaturerhöhung führt zur Zersetzung

¹⁰ top coat, engl.: Der Decklack

einem Arbeitsgang komplett gefertigt werden können. Warmhärtende Systeme härten bei Temperaturen zwischen 100°C und 160°C innerhalb von 2 bis 10 Stunden ab [RUG02, S. 62].

Epoxidharze weisen eine Schwindung zwischen 2% und 5 % auf, die schon vor der Gelierphase einsetzt. Fertigteile haben daher geringere Eigenspannungen und höhere Maßhaltigkeit als Teile aus UP- Harzen. Die mechanischen Eigenschaften sind hervorragend, sie werden daher für Hochleistungs- KVS eingesetzt. Nachteilig ist der gegenüber UP- Harzen etwa viermal höhere Preis, die lange Kalthärtungszeit und die Notwendigkeit der exakten Dosierung [EHR92, S. 48-55].

3.1.2.2 Thermoplastische Matrixsysteme

Die Entwicklung von thermoplastischen Matrices begründet sich u. a. aus dem Wunsch, bessere Eigenschaften als bei den bestehenden duromeren Werkstoffen zu erreichen. Im Vergleich zu Duromeren sind Thermoplaste schlagzäher und haben eine größere Bruchdehnung [FLE95, S. 243], vgl. Abb. 3-5 und **Abb. 3-6**.

Phys. Eigenschaft		Thermoplastische Matrix							
Einheit		PAI	PI	PP	PEEK	PES	PA66	PA66 CF20	PC
Dichte ρ	g/cm ³	1,4	1,42	0,9	1,32	1,37	1,14	1,22	1,2
Zugfestigkeit R	N/mm ²	120-180	70-150	25-250	70-100	70-95	82	150-220	55-75
Zugmodul E	N/mm ²	4100-5000	2000-3000	1000-1500	3700-4000	2400-2600	3300	11000-16000	2300-2400
Ausdehnungskoeffizient α^T	10 ⁻⁶ /K	27-36	30-60	60-100	60	55	90	25-75	66-70
Dauergebrauchstemperatur DGT	°C	230	250-320	100-120	250	190-200	110-180	120	125
Bruchdehnung	%	-	-	650	35	-	170		120

Abb. 3-6: Richtwerte thermoplastischer Matrixsysteme [MOS92, S. 51], [FLE96, S. 245], [RIW40]

Durch Thermoplaste besteht die Erweiterung der Verwertungsmöglichkeiten in z.B. werkstoffverwertbarer Form. Für duromere Werkstoffsysteme erscheint im

Vergleich dazu nur die thermische Verwertung kostengünstig bzw. möglich [FLE96, S. 290]. Weitere Vorteile sind die kurzen Zykluszeiten (Abkühlung statt Aushärtung), die Schweißbarkeit (Heißluft, Vibration, Hochfrequenz) und die unbegrenzte Lagerfähigkeit, da die chemische Vernetzung bereits erfolgt ist. Letztlich kann auch der Rohstoffpreis ein Auswahlkriterium sein, wenn der Bauteilpreis stark von dem des Matrixwerkstoffes abhängt, d.h. der Verstärkungsstoff vergleichsweise günstig (z.B. Glasfaser) ist.

Häufig verwendete thermoplastische Kunststoffe für Hochleistungsbauteile sind [MOS92, S. 50]:

- Polypropylen (PP)
- Polyamide (PA)
- Polystyrolcopolymerisate, z. B. SAN, ABS
- Polyacetate (POM)

Besonders warmfeste Thermoplaste sind Polycarbonate, lineare Polyacryloxyde und Sulfone, Polyacryletherketon (PEEK) und Polyethersulfon (PES). Hochwarmfeste Thermoplaste sind die linearen Polyimide, z. B. Polyimid (PI), Polyamidimid (PAI) und Polyetherimid (PEI) [MOS92, S. 50]. Eigenschaften thermoplastischer Matrixsysteme zeigt Abb. 3-6.

3.1.3 Vorimprägnierte Halbzeuge

Fasergewebe oder -gelege können mit dem Matrixwerkstoff in einem kontinuierlichen Verfahren vorimprägniert werden. Das entstehende Halbzeug wird Prepreg genannt, was sich von *preimpregnated* ableitet. Es gilt die Unterscheidung zwischen duromeren und thermoplastischen Prepregs. Die Verarbeitung zu Prepregs hat einige Vorteile gegenüber diskontinuierlichen Verfahren:

- Der insbesondere bei Thermoplasten schwierige Imprägnierungsvorgang wird vom Formprozess getrennt.
- Durch das kontinuierliche Verfahren kann ein hoher Automatisierungsgrad und Massedurchgang erreicht werden.

- Es ergeben sich gleichmäßige Faservolumengehalte mit hoher Reproduzierbarkeit, was für die Qualitätssicherung von sicherheitsrelevanten Bauteilen notwendig ist.
- Es sind keine weiteren Komponenten bei der Verarbeitung notwendig. Eine Verarbeitung erfolgt bei erhöhtem Druck und Temperatur, was bei Duromeren zur Aushärtung und bei Thermoplasten zum Schmelzen und in Form bringen führt.

Duomere Prepregs

Der Herstellprozess für duomere Prepregs verläuft in drei Stufen:

- Textile Aufbereitung: Abziehen und Ausrichten von Rovings, Gelegen oder Matten von der Rolle
- Imprägnierung: Die durch Temperaturerhöhung oder Lösungsmittelzugabe sehr dünnflüssige Matrix durchsetzt d.h. imprägniert die Fasergebilde bei kontrolliertem Faser/Harzverhältnis
- Konsolidierung: Gleichmäßige Einarbeitung der Matrix in das textile Gebilde über Walzen, Aufbringen der Schutz- und Trägerfolie auf Ober- und Unterseite, Einstellen auf Enddicke

Nach der Imprägnierung liegt die Prepregmatrix in einem sehr zähflüssigen oder festen Zustand vor, die Oberfläche bleibt klebrig. Die Verarbeitung erfolgt durch Auflegen und Andrücken der Prepregs auf die Form mit gewünschter Faserorientierung und Anzahl an Lagen und anschließend Aushärten unter Druck und Temperatur im Autoklaven, vgl. Kap. 3.4.

Nachteile:

Das duomere Prepreg ist nur wenige Monate lagerfähig; bei der Lagerung ist häufig eine Kühlung bei -18°C nötig. Nach der Erwärmung auf Raumtemperatur muss wegen der Gefahr der Überalterung stets die Werkstoffqualität geprüft werden und anschließend muss innerhalb weniger Stunden das gesamte auf Raumtemperatur erwärmte Material verarbeitet sein. Überschüssiges Material muss vernichtet werden.

Neuere Entwicklungen erlauben auch die Lagerung der Prepregs bei Raumtemperatur über mehrere Wochen, was zu deutlichen Kosteneinsparungen und auch zu größerer Verbreitung führen wird. Der Faservolumengehalt liegt etwa bei 55 % [RGP02, S. 42].

Thermoplastische Halbzeuge

Thermoplaste haben gegenüber duromeren Systemen im Schmelzbereich eine deutlich höhere Viskosität. So liegen die Viskositäten von Epoxidharzen bei 25°C häufig zwischen 600 und 900 mPas [RUG02, S. 69], die von Polycarbonat je nach Temperatur im Bereich zwischen 10^4 bis 10^5 mPas. Dadurch wird bei der thermoplastischen Prepregherstellung die vollständige Imprägnierung erschwert [FLE96, S. 128].

Ein weiterverarbeitbares flächiges Halbzeug aus mehreren Lagen faserverstärkter Thermoplaste trägt die Bezeichnung *organisches Blech* [FLE96, S. 134].

Entscheidender Nachteil eines thermoplastischen Halbzeuges gegenüber einem duromeren ist die nicht vorhandene Drapierbarkeit. Komplexe Formen können nur schwer abgebildet werden. Eine Lösung besteht darin, ein textiles, drapierfähiges Halbzeug aus Matrix- und Verstärkungsfasern zu erzeugen. Die Matrix kann hierbei mit dem Verstärkungswerkstoff als Mischroving gesponnen werden, der dann zu Gewebe oder Gelege verarbeitet wird. Eine weitere Möglichkeit ist das direkte Weben von Matrixrovings und Verstärkungsfaservovings oder die Ummantelung des Verstärkungsrovings mit einem thermoplastischen Schlauch, wodurch allerdings die Drapierfähigkeit stark abnimmt. Der Nachteil der Halbzeuge mit textiler Matrix ist, dass das textile Gebilde in der Form auf Schmelztemperatur gebracht und wieder abgekühlt werden muss, was geringe Taktzeiten, Probleme bei der Wirtschaftlichkeit und die Gefahr der nicht vollständigen Imprägnierung ergibt [FLE96, S. 142].

Aus dem Nachteil der schlechten Drapierbarkeit leitet sich ab, dass das thermoplastische Halbzeug bei komplexer Formgebung große Umformgrade ertragen muss, was bei einer Verstärkung mit Lang- oder Endlosfasern aber kaum möglich ist, da die Fasern nicht nachfließen können und aufgrund der geringen Bruchdehnung reißen würden.

3.1.4 Preformlinge

Die Erzeugung von Preformlingen beruht auf der Idee, die Belegungszeit der teuren Werkzeuge zu verringern, indem nur vorgeformte Fasergebilde in die Form eingelegt werden, die dann z. B. durch das Harzinjektionsverfahren (vgl. Kap. 3.4) mit der Matrix imprägniert werden. Die Preformlinge können dafür in einfachen Formen mit geringer Oberflächenqualität, die entsprechend günstig sind, vorgefertigt werden. Probleme ergeben sich durch die begrenzte Verformbarkeit der textilen Gebilde. Während sich Wirrfasermatten noch gut verformen lassen, sind bei Endlofasergebilden die Umformgrade gering. Außerdem werden häufig thermoplastische Binder verwendet, wodurch zur Umformung entsprechend hohe Temperaturen notwendig sind. Eine Kaltverformung kann durch das Einweben von Metallfäden, die sich bei der Umformung plastisch verformen können und diese aufgezwungene Form beibehalten, erreicht werden [FLE96, S. 145-156].

3.2 Mikromechanik

Die herausragenden Eigenschaften der Faser-Kunststoff- Verbund- Werkstoffe führen insbesondere dann zu hoher Wertschöpfung, wenn die mechanischen Eigenschaften, hohe Zugfestigkeit und hoher E- Modul bei geringem Gewicht, voll ausgenutzt werden. Für hochbelastete Leichtbaustrukturen sind diese Werkstoffe daher besonders gut geeignet. Das verwendete Grundelement ist dabei die UD- Schicht (vgl. Kap. 3.1.1.4) [EHR92, S. 78]. Entlang der Faserrichtung wird damit eine hohe Verstärkungswirkung der Matrix erreicht. Quer zur Faserrichtung tritt dagegen eine Schwächung der reinen Matrix auf. Den Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Faserorientierung zeigt **Abb. 3-7**. Bereits bei einem Winkel von wenigen Grad zwischen Krafrichtung und Faserrichtung tritt eine deutliche Abnahme der Zugfestigkeit ein, die bei ca. 45° den Wert der reinen Matrix erreicht und diesen bei noch größeren Winkeln sogar unterschreitet.

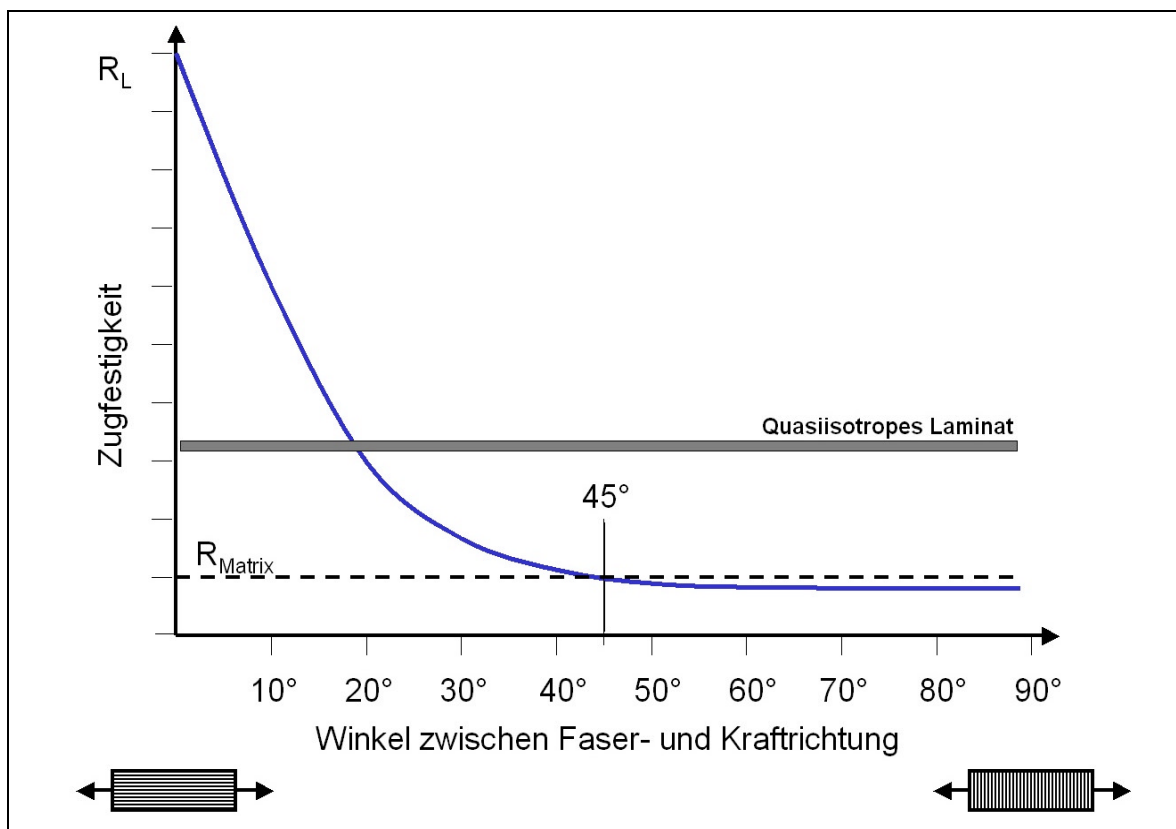


Abb. 3-7: Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Faserorientierung [EHR92, S. 80]

Im Vergleich dazu erreicht ein quasiisotropes Laminat¹¹ (vgl. Kap. 3.3), bei dem die Faserrichtungen 0°, 120° und 240° betragen, unabhängig vom Winkel einen Wert, der bei etwa einem Drittel des maximalen Wertes liegt. Damit werden die Fasereigenschaften nicht mehr optimal genutzt und die Reißlänge erreicht, z. B. bei Verwendung von Glasfasern nur noch Werte im Bereich metallischer Werkstoffe wie Aluminium (~ 20 km [EHR92, S. 77], vgl. Abb. 3-1 u. Abb. 3-2).

3.3 Laminataufbau

Leichtbaukonstruktionen bestehen sehr häufig aus dünnwandigen Hohlstrukturen, die Biegung, Zug, Druck, Torsion und Schub ausgesetzt sein können. Je nach Anwendungsfall müssen sie daher an die einwirkenden Belastungen angepasst sein. Dies geschieht dadurch, dass die Fasern in bestimmten Richtungen angeordnet werden. Da die verwendeten Faserhalbzeuge aber nur in bestimmter Dicke verfügbar sind, müssen oft sehr viele Lagen mit unterschiedlichen

¹¹ Lamina, lat.: Die Schicht

Richtungen aufeinander gebracht werden, um eine ausreichende Bauteildicke zu erreichen. Ergebnis dieser Schichtung ist das Laminat. Bei der bereichsweisen Betrachtung des Laminats als Ebene kann für diesen Bereich bezüglich verschiedener Ebenenrichtungen unterschiedliches mechanisches Verhalten auftreten. Das Laminat verhält sich dann *anisotrop*. Sind die Laminatschichten zu drei senkrecht aufeinander stehenden Ebenen symmetrisch ergibt sich ein *orthotropes* Verhalten. Dies gilt z. B. für ein reines UD- Laminat oder für Gewebelamine, bei denen Kett- und Schussrichtung des verwendeten Faserhalbzeugs senkrecht aufeinander stehen. Zeigen alle Richtungen gleiches Verhalten, ist das Laminat *quasiisotrop* [MIC95, S. 40] (vgl. Abb. 3-7).

Durch einen orthotropen Aufbau ergibt sich automatisch, dass der Laminataufbau symmetrisch zur Mittelebene ist, **Abb. 3-8**. Dadurch kommt es zu gleichmäßigen Eigenspannungen auf Ober- und Unterseite während der Bauteilerstellung. Die Eigenspannungen entstehen bei Duromeren durch Schwindung bei der Aushärtung bzw. bei Thermoplasten durch die Volumenschwindung beim Abkühlen. Kann dies nicht gewährleistet werden, führen die Eigenspannungen bei dünnen Strukturen auch ohne äußere Belastung zu Verformungen.

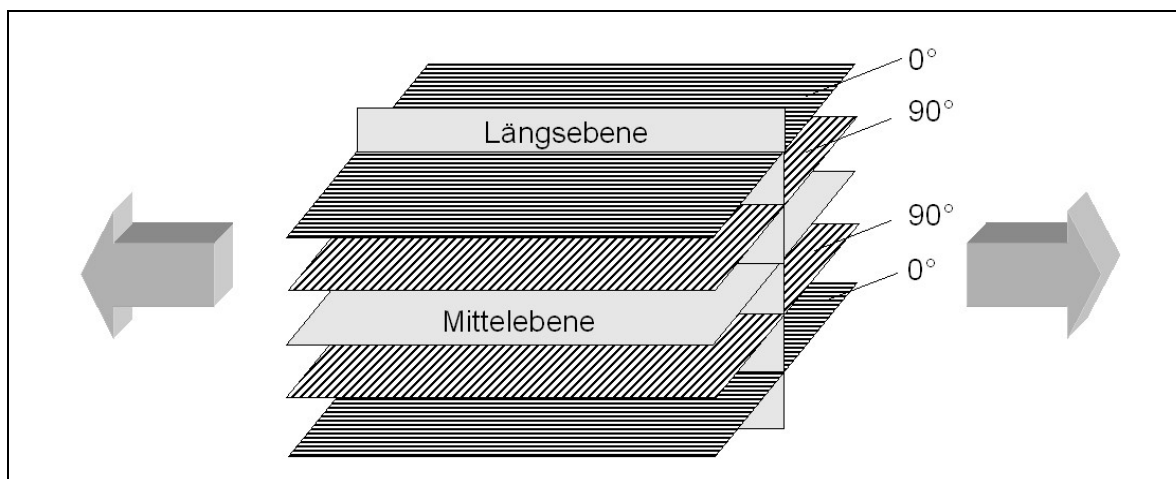


Abb. 3-8: Beispiel: Orthotroper Lagenaufbau eines Laminats unter Zugkraft

Generell führen bei einem orthotropen Laminat Normalspannungen nur zu Dehnungen und Schubspannungen nur zu Schiebungen, wenn die Krafrichtung der Orthotropierichtung entspricht. Verläuft die Richtung nicht entlang der Orthotropieachsen oder ist der Aufbau asymmetrisch, ergeben sich Verformungen, z.B. Krümmungen oder Drillungen [MIC95, S. 40].

Bezüglich der quer angreifenden Zugkraft ist der Aufbau dieses schematischen Laminates mit $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$ orthotrop. Ein weiterer Vorteil dieses Aufbaus ist die Biegesteifigkeit in Richtung der angreifenden Kraft. Die 0° - Schichten bewirken, da sie außen liegen und einen Abstand zur neutralen Faser aufweisen, ein höheres Flächenträgheitsmoment. Quer zur Krafrichtung ist die gleiche Zugsteifigkeit, aber eine deutlich geringere Biegesteifigkeit zu erwarten, da die kraftaufnehmenden Fasern dicht an der neutralen Faser liegen.

3.4 Fertigungsverfahren

Faser- Kunststoff- Verbund- Bauteile können durch eine Reihe von Verfahren hergestellt werden. Grundsätzlich unterscheiden sie sich zunächst durch den verwendeten Matrixwerkstoff. Für duromere Matrices ergeben sich kostengünstige Verfahren für Einzelfertigung sowie kleine und große Serien. Bei Verfahren für thermoplastische Matrices sind aufgrund der notwendigen Werkzeugerwärmung und Werkstoffaufschmelzung die Investitionskosten höher, deshalb sind sie für die Einzelfertigung nicht geeignet. Einen grundlegenden Eigenschaftsvergleich der Verfahren zeigt im Anhang die **Tab. A 1** bis **Tab. A 3**, die auch als Auswahlhilfe dienen.

Häufig müssen Bauteile aus FKV- Werkstoffen nach dem Entformen nachbearbeitet werden. Bei offenen Schalen müssen die Ränder z. B. besäumt, bei geschlossenen Körpern die Trennnähte entgratet werden. Spanabhebende Bearbeitung ist dafür grundsätzlich möglich.

3.4.1 Hand- und teilmechanische Nassverfahren

Manuelles Nasslaminierverfahren

Das älteste und noch immer verbreitete Verfahren ist das manuelle Nasslaminierverfahren. Dabei wird in eine Negativ- oder auf eine Positivform ein Faserhalbzeug zusammen mit einem duromeren Harzsystem aufgetragen und

fixiert, Abb. 3-9. Es lassen sich über die Schichtenanzahl beliebige Wandstärken aufbauen. Nach dem Aushärten des Harzes (oft nach 24 Stunden) kann das Werkstück aus der Form entnommen werden.

Das Verfahren weist u. a. folgende Eigenschaften auf [FLE96, S. 26] (vgl. Tab. A1):

- Nasse Imprägnierung mit geringem bis mittlerem Faservolumengehalt
- Meist drucklose Härtung
- Lange Zykluszeiten
- Sehr geringe Investitionskosten
- Offene Verarbeitung: notwendiger Arbeitsschutz
- Geringere Reproduzierbarkeit: Streuung der Bauteileigenschaften
- Herstellung großer Bauteile mit geringen Stückzahlen

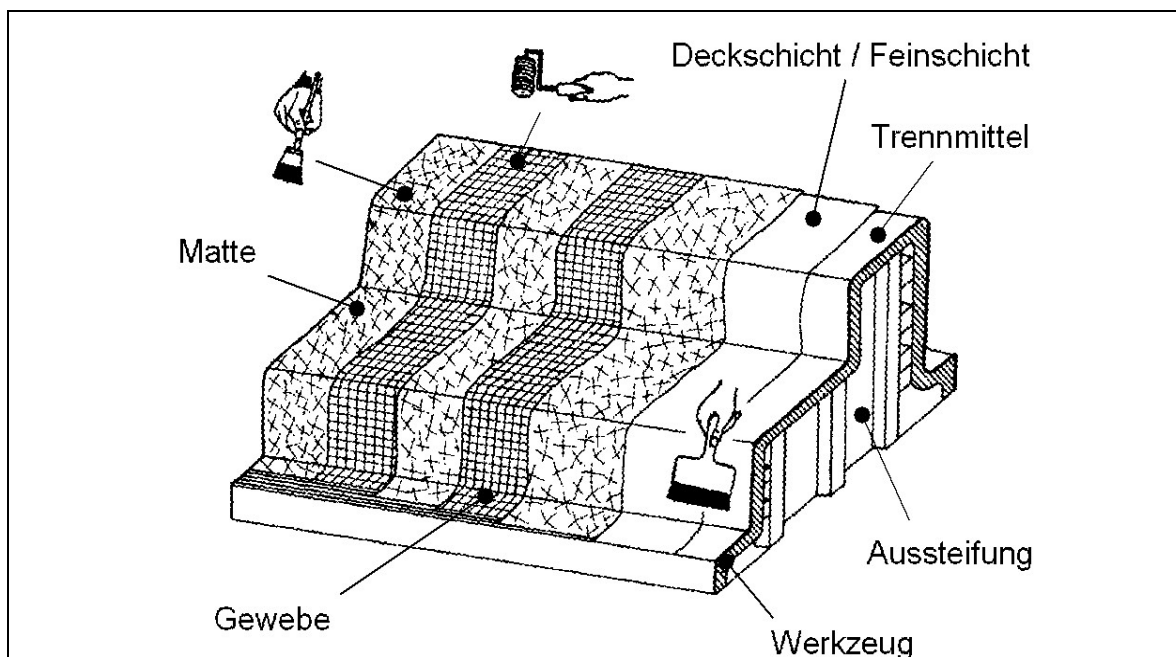


Abb. 3-9: Manuelles Nasslaminierverfahren [EHR92, S. 110]

Niederdruckverfahren

Niederdruckverfahren dienen dazu, überschüssiges Harz und auch Luft aus dem imprägnierten Faserhalbzeug herauszupressen. Damit steigt der Faservolumengehalt und die Reproduzierbarkeit und es sinken der Luftporengehalt und das Bauteilgewicht, was zu Hochleistungs- Bauteilen führen kann.

1. Vakuumsack- Verfahren

Das Vakuumsack- Verfahren kann beim manuellen Nasslaminieren erfolgen, nachdem alle Schichten aufgebracht sind und bevor die Gelierphase der Matrix einsetzt, **Abb. 3-10**.

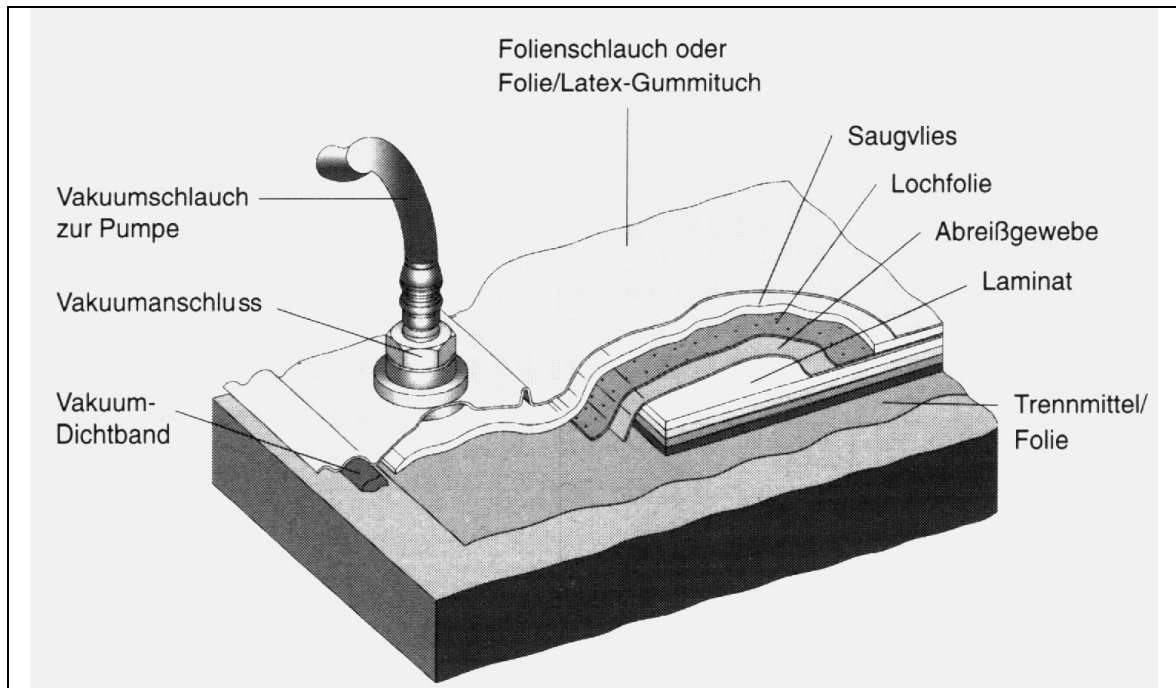


Abb. 3-10: Vakuumsackverfahren [RUG02, S. 215]

Dafür wird das Bauteil und die Form in einen Folienbeutel gelegt und der Beutel luftdicht verschlossen. Sehr große Bauteile können auch nur mit Folie abgedeckt werden, die am Formenrand luftdicht gegenüber der Umgebung abgedichtet wird. Anschließend wird über einen speziellen Anschluss die Luft zwischen Laminat und Folie abgesaugt. Durch den Umgebungsdruck presst sich die Folie an das Laminat und dieses damit an die Form. Der mögliche Pressdruck liegt bei etwa 0,9 bar, das entspricht $9 \cdot 10^4 \text{ N / m}^2$ oder 9 Tonnen / m^2 . Die Verwendung von Lochfolie, Abreißgewebe und Saugvlies hat dabei mehrere Funktionen. Das Saugvlies ermöglicht die Verteilung eines konstanten Vakuums in allen Bereichen und saugt überschüssiges Harz auf. Die Lochfolie trennt das Saugvlies vom Werkstück. Das Abreißgewebe wird verwendet, wenn eine gleichmäßig raue Oberfläche gefordert ist. Es wird vollständig mitimprägniert und nach dem Aushärten abgezogen [RUG02, S. 215].

2. Drucksack- Verfahren

Das Drucksack- Verfahren ermöglicht höhere Drücke durch die Verwendung von Pressluft. Mit Hilfe einer Folie, die gegen das Werkstück bzw. die Form und über eine Druckplatte gegenüber der Umgebung abgedichtet ist, wird der Druck auf das Werkstück übertragen, **Abb. 3-11**. Das Verfahren eignet sich insbesondere dann, wenn ein planer Formenrand gewährleistet ist.

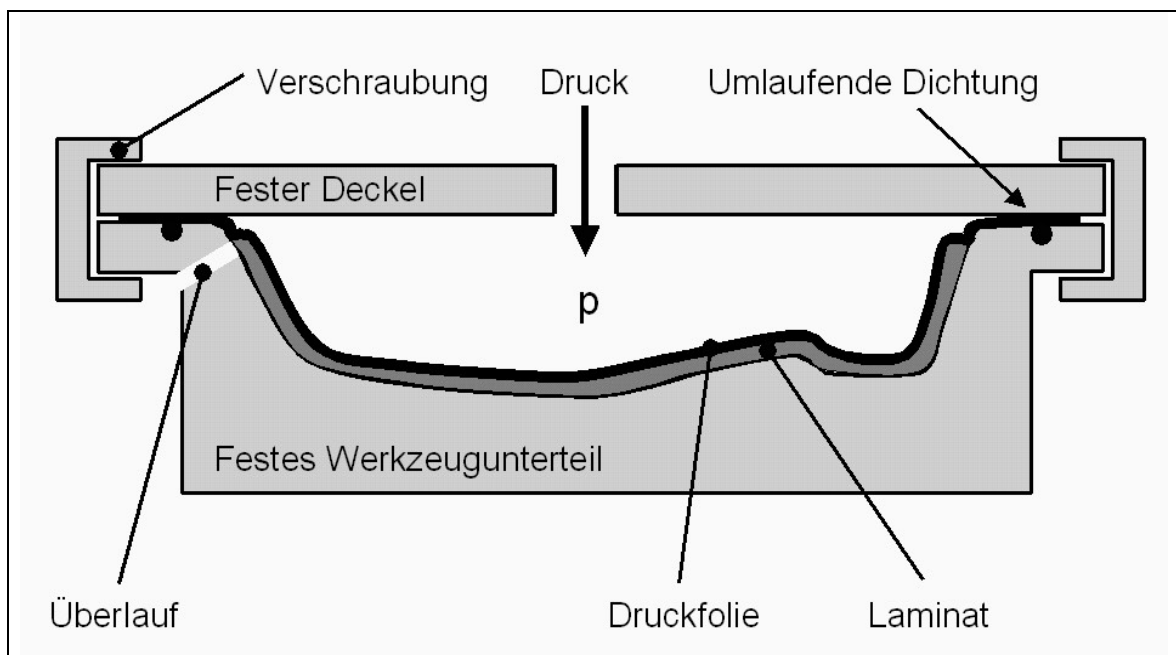


Abb. 3-11: Drucksack- Verfahren [nach EHR92, S. 112]

Durch den hohen Druck müssen Deckel, Form und der Verschlussmechanismus massiv ausgeführt sein, um Verformungen auszuschließen.

3. Autoklav- Verfahren

Das Autoklav- Verfahren hat den gleichen Aufbau wie das Vakuumpressen, nur der Umgebungsdruck und die Umgebungstemperatur sind variabel. Es lassen sich daher geringere Zykluszeiten erreichen. Der Autoklav stellt im Wesentlichen eine geschlossene und beheizbare Druckkammer dar, **Abb. 3-12**.

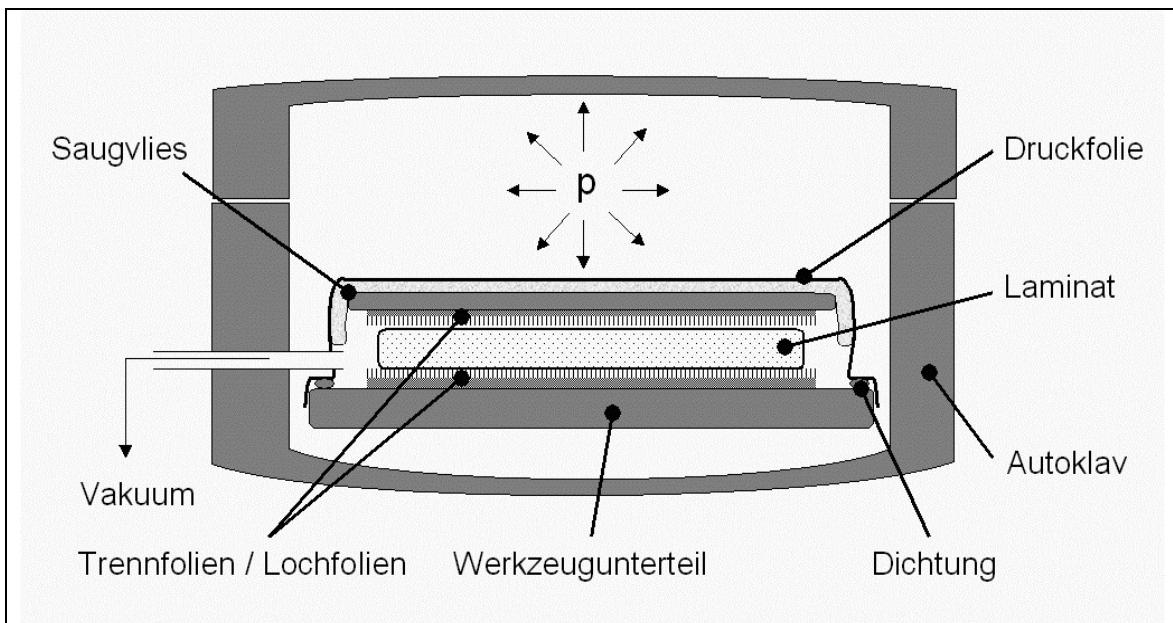


Abb. 3-12: Verdichten im Autoklaven

4. Harzinjektionsverfahren / Resin- Transfer- Moulding

Beim Resin- Transfer- Moulding- Verfahren wird das Faserhalbzeug zunächst trocken in die Form eingebracht. Anschließend wird die Form über eine zweite Formhälfte oder eine Folie gegen die Umgebung abgedichtet. Darauf folgt die Absaugung der Luft innerhalb des sich gebildeten Hohlraumes und die Injektion der dünnflüssigen Matrix über reines Einsaugen oder durch zusätzlichen Druck in die Form. Die Fasern werden dadurch im Idealfall porenfrei mit dem Matrixwerkstoff imprägniert, wobei ein hoher Faservolumengehalt erreicht wird.

Wesentliche Merkmale des Verfahrens sind [FLE96, S. 29] (vgl. Tab. A 1):

- Geringe Investitionen: günstige Formmulden
- Unterdruck oder geringer Arbeitsdruck sind zur Einbringung der Matrix möglich
- Lange Zykluszeiten und geringe Materialdurchsätze
- Geschlossenes Nassimprägnierverfahren mit hohem Fasergehalt bis 80%

Durch Einspritzen des Harz/Härter- Gemisches unter (hohem) Druck ergibt sich die Notwendigkeit von zwei massiven, teuren Formhälften und einer steifen Schließereinheit. Höhere Taktzeiten lassen sich durch die Verwendung von Preformlingen, beheizte Werkzeuge, reaktivere Harzsysteme oder die Erhöhung der Anspritzpunkte erreichen.

Faser / Harz- Spritzen

Das Faser / Harz- Spritzen stellt eine Entwicklung des manuellen Nasslaminierens in Richtung Automatisierung dar, da über eine Vorrichtung Faser und Matrix gezielt auf die Form aufgetragen werden können. Es eignet sich für großflächige Bauteile, die nur geringen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind.

Es ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet [FLE96_31] (vgl. Tab. A 1):

- Geringe Investitionskosten: einteilige, einfache Werkzeuge
- Drucklose Aushärtung: niedriger Faservolumengehalt, hoher Porengehalt
- Nassimprägnierverfahren mit offener Verarbeitung: Arbeitsschutz
- Zufällige Faserorientierung: geringe Festigkeiten
- Lange Zykluszeiten

3.4.2 Diskontinuierliche Verfahren

Die diskontinuierlichen Verfahren zeichnen sich durch hohe oder vollständige Automatisierung aus und sind für die Serienfertigung insbesondere in großen Stückzahlen geeignet. Unterschieden wird zwischen Heiß- oder Kaltpressverfahren und Wickelverfahren.

Wickelverfahren

Beim Wickelverfahren werden mit Harz getränkte Rovings auf einen sich drehenden Wickelkörper aufgetragen. Dafür können z. B. bei rotations-symmetrischen Teilen drehmaschinenähnliche Maschinen verwendet werden. Es sind auch komplexere Körper, z. B. Rohrkrümmer, nass wickelbar. Allerdings muss dann die Steuerung der Rovingzuführung und des Werkstücks räumlich erfolgen, was den Aufwand deutlich erhöht. Sehr komplexe Körper können zunächst auch über einen trockenen Flechtvorgang mit mehreren Rovings gleichzeitig umwickelt werden, die anschließend durch das RTM- Verfahren (vgl. Kap. 3.4.1) mit Harz imprägniert werden [EHR92, S. 130].

Der Kern kann dabei wiederverwendbar (metallischer Wickeldorn, konisch oder segmentiert), zerstörend (Wachs, Gips u. a.) oder verloren (überwickelte Hohlstruktur z.B. aus Metall, die im Werkstück verbleibt) sein.

Pressverfahren

Allen Pressverfahren ist gemein, dass ein flächiges Halbzeug innerhalb einer Formmulde unter Druck umgeformt und verdichtet wird [FLE96, S. 35].

1. Nasspressen

Beim Nasspressen werden zunächst trockene Verstärkungsmaterialien in beliebiger Form oder Faservorformlinge in die Form eingelegt. Danach wird eine exakt dosierte Menge Harz/Härter- Gemisch eingegossen oder injiziert und das Werkzeug geschlossen. Die Schließgeschwindigkeit ist so eingestellt, dass ein Aufreißen der Faserhalbzeuge (fiber washing) durch zu hohe Strömungsgeschwindigkeit des Harzes vermieden wird. Die Werkzeugtemperatur beträgt je nach Art des Harzes 90 bis 140 °C, der Pressdruck 5 bis 25 bar. Es können kurze Zykluszeiten erreicht werden [RUG02, S. 28].

2. Taktpress- Verfahren

Das Taktpress- Verfahren dient der Verarbeitung von thermoplastischem Halbzeug. Für amorphe Polymere erfolgt der Umformvorgang in der kalten Form unterhalb der Erstarrungstemperatur. Teilkristalline Polymere werden in der heißen Form umgeformt und gezielt unter Druck abgekühlt, **Abb. 3-13**.

Das Verfahren hat unter der Bezeichnung *GMT* (Glasmattenverstärkter Thermoplast) Serienstandard in der Automobilindustrie [FLE96, S. 38]. GMT stellen die wichtigste Gruppe der Halbzeuge mit thermoplastischer Matrix dar, Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polybutylenterephthalat (PBTP), Polyamid (PA) und Polyurethan (PUR) finden als Matrix Verwendung [EHR92, S. 106]. Da hier ungerichtete Faserstrukturen eingesetzt werden, sind die mechanischen Eigenschaften begrenzt.

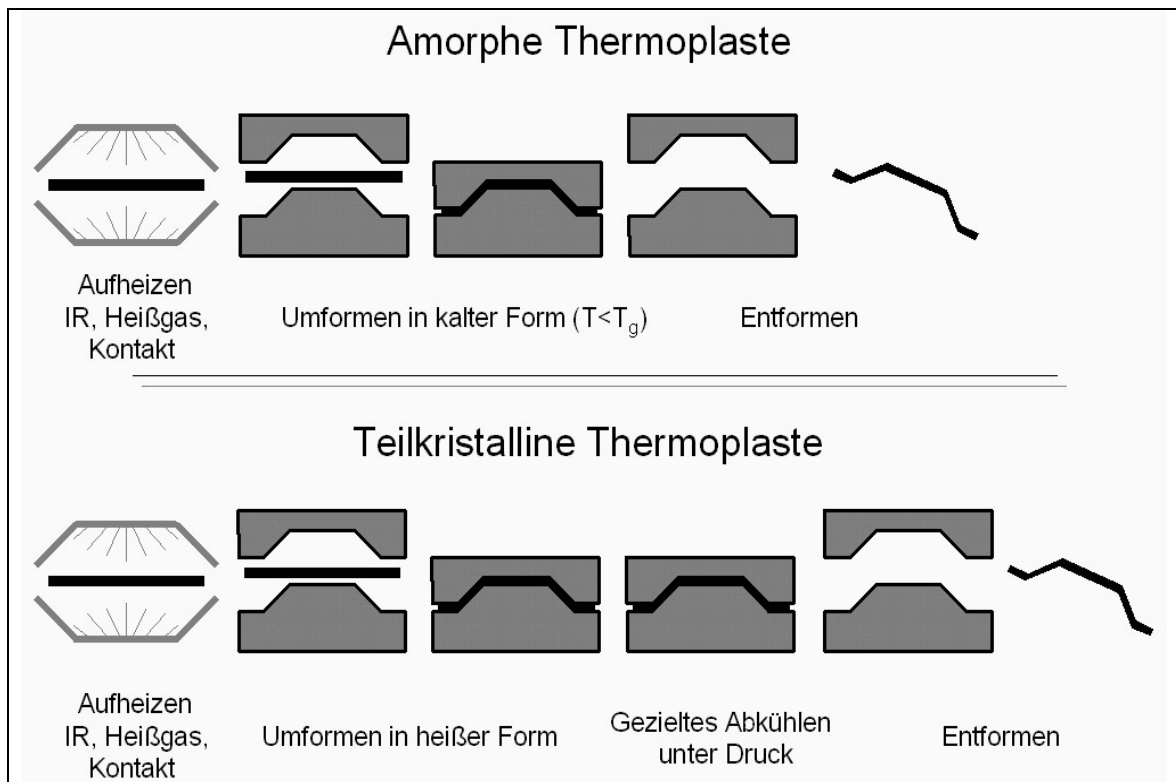


Abb. 3-13: Taktpressen von thermoplastischem Halbzeug [FLE96, S. 38]

3. Sheet- Moulding- Compound- Verfahren

Für das SMC- Verfahren werden als Faserhalbzeug Roving- Kurzfasern mit einer Länge zwischen 20 und 50 mm eingesetzt (vgl. Kap. 3.1.1.3), die mit duromeren Harzsystemen (häufig UP- Harze) innerhalb einer Walzenstrecke imprägniert und konsolidiert werden. Es ergibt sich dadurch ein zwischen zwei Trägerfolien befindliches fließfähiges und quasi endloses Band (sheet), das auf Rollen aufgewickelt wird. Nach einer Reifezeit von 2 bis 4 Wochen kann das SMC verarbeitet werden. Es wird in exakt definierte Stücke geschnitten, im Presswerkzeug positioniert und durch den Pressvorgang, der in der Regel als Heißpressvorgang durchgeführt wird, umgeformt. In Deutschland werden für die SMC- Formmassen 50 % der faserverstärkten duromeren Harze verwendet. Das Verfahren hat relativ geringe Herstellkosten, einen relativ großen Materialdurchsatz und findet z.B. in der Automobilindustrie breite Anwendung. Die mechanischen Eigenschaften sind durch die Verwendung von Kurzfasern und den geringen Faservolumengehalt begrenzt [FLE96, S. 37].

Je nach Faserstruktur gibt es die Bezeichnungen [EHR92, S. 121]:

- SMC-R (random)
Regellos geschnittene Glasfasern zwischen 20 und 50 mm Länge
- SMC-C (continuous)
Unorientiert liegende Glasfasern und endlos gerichtete Glasfaserstränge
- SMC-D (directed)
Geschnittene unorientiert liegende und gerichtete Glasfasern

Für Formteile mit unterschiedlichen oder scharf abgesetzten Wandstärken werden Kompaktformmassen (BMC: *Bulk Moulding Compound*) eingesetzt [RUG02, S. 28].

4. Diaphragma- Verfahren

Bei diesem Verfahren wird das Laminat zwischen zwei dehnbaren Folien unter Vakuum fixiert. Nach Erreichen der Schmelztemperatur der Laminatmatrix wird über hydrostatischen Druck der gesamte Aufbau in der Form umgeformt und das Laminat konsolidiert.

Spritzguss

Für den Spritzguss kommen duomere, thermoplastische oder elastomere Werkstoffe zum Einsatz. Die Aushärtung, Abkühlung oder Vulkanisation erfolgt dabei im Werkzeug.

Die Prozessparameter sind für diese beiden Werkstoffgruppen dabei grundsätzlich unterschiedlich. Während der duomere Spritzguss mit Drücken um 100 bar und Temperaturen um 100°C erfolgt, werden beim thermoplastischen Spritzguss Drücke von mehreren 100 bis über 1000 bar und, je nach Werkstoff, Temperaturen oberhalb von 200°C verwendet.

Das Spritzguss- Verfahren ist das Standardverarbeitungsverfahren für die Serienfertigung von Kunststoffbauteilen. Es ist möglich, faserverstärkte Formmassen einzusetzen. Hierfür kommen in der Regel kurze Glasfasern, aber auch kurze Kohlefasern zum Einsatz, wobei der polymere Werkstoff in Granulat- oder Pulverform vorliegt. Die Werkzeuge unterliegen durch die Faserverstärkung

einem sehr hohen Verschleiß. Die mechanischen Eigenschaften sind wesentlich schlechter als bei Endlosfaserverstärkung. Eine Verbesserung wird durch den Einsatz von langfaserverstärkten Thermoplasten (LVT) erreicht. Liegt der Werkstoff in Granulatform vor, erreichen die Fasern eine Länge von z.B. 12 mm [BRAS01, S. 15].

3.4.3 Kontinuierliche Verfahren

Plattenlaminieren

Das Plattenlaminieren oder kontinuierliche Laminieren ermöglicht die Herstellung ebener, endloser Bahnen mit konstantem Querschnitt unter Verwendung von duromeren Matrixsystemen. Die Bahnen können auch innerhalb gewisser Grenzen längs- oder quergewellt sein. Das Verfahren entspricht im Wesentlichen der Prepregherstellung (vgl. Kap. 3.1.3), mit dem Unterschied, dass die duromeren Matrixsysteme vollständig ausgehärtet werden [EHR92, S. 127]. Ein Aufwickeln ist danach nicht mehr möglich, es erfolgt daher ein Plattenzuschnitt, z.B. auf die Größe 2x1 m [RUG02, S. 199].

Strangziehen (Pultrusion)

Mit diesem Verfahren werden kontinuierliche Profile unterschiedlichster Form hergestellt. Die Verstärkungswerkstoffe können in Rovingform oder auch als Bänder, die verschiedene Faserrichtungen und -längen aufweisen können, eingezogen und mit dem Matrixwerkstoff imprägniert werden. Danach erfolgt die Formgebung im Werkzeug mit gleichzeitiger Aushärtung der duromeren bzw. Abkühlung der thermoplastischen Matrix. Eine vollständige Aushärtung für duromere Matrixsysteme wird im nachgeschalteten Durchlaufofen erreicht. Zum Schluss erfolgt der Zuschnitt auf bestimmte Länge [EHR92, S. 128], [FLE96, S. 160f].

3.5 Berechnungsverfahren nach VDI- Richtlinie 2014

Für die Dimensionierung bzw. Vordimensionierung von Faser- Kunststoff- Verbund- Laminaten sind eine Reihe von analytischen Berechnungstheorien bekannt.

Die Analyse in Bereichen einzelner Fasern mit umgebender Matrix wird Mikromechanik genannt. Die Betrachtung des Ersatzmodells einer als homogen angenommenen Einzelschicht ist bereits eine makromechanische Betrachtung. Die herausragenden mechanischen Eigenschaften der Fasern werden dabei innerhalb der Schicht „verschmiert“. Fertigungstechnisch bedingt können mehrere gleiche Gelegelagen gleicher Richtung übereinander laminiert werden. Dann wird dieser Verbund auch als Einzelschicht betrachtet. Der Schichtverbund aus Einzelschichten unterschiedlicher Faserrichtungen wird dann u. a. über Verfahren wie die Netztheorie oder die klassische Laminattheorie berechnet [VDI97, S. 5].

3.5.1 Berechnung der Einzelschicht

Für die Berechnung der Einzelschicht müssen folgende Angaben vorhanden sein oder berechnet werden:

- Einzelschichtdicke
- Fasergehalt
- Art und Orientierung der Verstärkung
- Technische Kennwerte für Verformungsverhalten und Festigkeit

3.5.2 Berechnungen des Schichtverbundes

3.5.2.1 Netztheorie

In der Modellvorstellung der Netztheorie herrscht die Annahme, dass Fasern, die parallel in ebenen aufeinanderliegenden Einzelschichten beliebiger Richtung eingebettet sind, Zug- und Druckkräfte aufnehmen, die einer reinen Membranbeanspruchung entsprechen. Die Matrix dient nur als Stützwerkstoff, die

ein Ausknicken bei Druck verhindert, aber selber keine Kräfte aufnimmt. Es werden für die Berechnung die angreifenden Kräfte, die (drei) Verstärkungsrichtungen, die Festigkeiten der Fasern und die Bauteilabmaße benötigt. Die Einzelkraftflüsse in Richtung der gewählten Verstärkungsrichtungen werden über ein Gleichungssystem aus den Kraftsummen unter statischer Bestimmtheit berechnet. Mit diesem Ergebnis und der Faserfestigkeit sind anschließend die erforderlichen Schichtdicken berechenbar. Ziel der Optimierung ist meistens das Erreichen einer minimalen Gesamtdicke unter Variation der Schichtwinkel. Dafür gibt es immer mehrere Lösungen.

Das Verfahren eignet sich im Bereich des Entwurfes für den Vergleich von Laminaten und führt nur zu einer Vorauswahl. Eine Berechnung von Steifigkeiten oder Biegungen ist mit diesem Verfahren nicht möglich, hierfür wird die *Klassische Laminattheorie* (vgl. Kap. 3.5.2.2) verwendet [VDI97, S. 17].

Das allgemein zu lösende Gleichungssystem für drei UD- Schicht- Verstärkungsrichtungen lautet [VDI97, S. 17]:

$$\begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} n_{f1}c_1^2 & n_{f2}c_2^2 & n_{f3}c_3^2 \\ n_{f1}s_1^2 & n_{f2}s_2^2 & n_{f3}s_3^2 \\ n_{f1}s_1c_1 & n_{f2}s_2c_2 & n_{f3}s_3c_3 \end{Bmatrix}. \quad \text{Gl. 3-1}$$

Mit: $c_x = \cos \alpha_x$: Mit α = Winkel der x- ten Verstärkungsrichtung
 $s_x = \sin \alpha_x$: Mit α = Winkel der x- ten Verstärkungsrichtung
 n_x, n_y, n_{xy} : Schnittkraftfluss in den Hauptrichtungen [N/mm]
 n_{fx} : Zu berechnender Kraftfluss in Faserrichtung x [N/mm]

Das Gleichungssystem ist nach den Kraftflüssen in den Faserrichtungen (z.B. mit Hilfe der Cramer' schen Regel [BRO89, S. 159]) aufzulösen.

Die Netztheorie erlaubt zudem das Finden optimaler Faserorientierungen für *eine* oder *mehrere* ebene Beanspruchungen mit jeweils zwei Einzelfällen [VDI97, S. 19]:

Optimierung auf **eine** ebene Beanspruchung:

1. n_I und n_{II} haben gleiche Vorzeichen: Die Schichten sind so zu wählen, dass die Kraftflüsse in Faserrichtung das gleiche Vorzeichen wie die Hauptnormalkraftflüsse aufweisen. Die Dicken richten sich nach der Höhe der

angreifenden Hauptnormalkraftflüsse und können unterschiedlich sein. Das optimale zweischichtige Fasernetz ergibt sich aus:

$$\beta_2 = \arctan \left[\frac{n_{II} / n_I}{\tan \beta_1} \right] ; \quad \text{Gl. 3-2}$$

Mit: β_x : Winkel der x- ten Verstärkungsrichtung zum Koordinatensystem der Hauptspannungsrichtungen
 n_I, n_{II} : Schnittkraftfluss in den Hauptrichtungen [N/mm]

$$\begin{Bmatrix} n_I \\ n_{II} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta_1 & \cos^2 \beta_2 \\ \sin^2 \beta_1 & \sin^2 \beta_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_{f1} \\ n_{f2} \end{Bmatrix} . \quad \text{Gl. 3-3}$$

Mit: β_x : Winkel der x- ten Verstärkungsrichtung zum Koordinatensystem der Hauptspannungsrichtungen
 n_I, n_{II} : Schnittkraftfluss in den Hauptrichtungen [N/mm]

Beispiel: Gesucht ist der optimale Faserwinkel für einen Druckkessel mit der Zwangsbedingung: $n_{II} / n_I = 2/1$ (Umfangs- zu Längsrichtung) und symmetrischer Anordnung der Faserrichtungen: $\beta_1 = -\beta_2$.

Aus Gl. 3-2 folgt: $\tan \beta \cdot \tan(-\beta) = 2 \Rightarrow \beta = \arctan \sqrt{2} = \pm 54,7^\circ$.

2. n_I und n_{II} haben ungleiche Vorzeichen: Je eine Schicht verläuft in Richtung der beiden Hauptnormalkräfte. Die Faserwinkel betragen 0° und 90° bezüglich des Koordinatensystems der Hauptspannungsrichtungen.

Optimierung auf **mehrere** Ebene Beanspruchungen (Lastfälle):

1. Das Netz kann für einen Hauptbeanspruchungszustand entworfen werden. Eventuell vorhandene geringe Nebenbeanspruchungen können durch die Matrix aufgenommen werden.
2. Auch die Nebenbeanspruchungen erreichen große Werte. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Verstärkung in mindestens drei Raumrichtungen, wobei die einzelnen Schichtdicken unterschiedlich sein können. Außerdem sind zwei weitere Fälle zu unterscheiden:
 - a. n_I und n_{II} haben gleiche Vorzeichen: Eine Schicht verläuft in Richtung der größten Hauptnormalkraft, weitere Schichtwinkel werden über die Gleichung Gl. 3-1 bestimmt.

- b. n_I und n_{II} haben ungleiche Vorzeichen: Je eine Schicht verläuft in Richtung der beiden Hauptnormalkräfte. Die dritte Schicht kann über die Gleichung Gl. 3-1 bestimmt werden.

Es ist eine Auslegung auf gleich dicke Schichten möglich, die gleich hohe Belastungen aufweisen, wobei nur der Schichtwinkel variiert wird. Das ist dann besonders sinnvoll, wenn nur ein Verstärkungshalbzeug bestimmter Gewichtsklasse verwendet werden soll oder das Verhältnis der angreifenden Kräfte unabhängig von der Höhe bekannt ist.

3.5.2.2 Klassische Laminattheorie

Die klassische Laminattheorie berücksichtigt sowohl die Fasern als auch die Matrix für die Lastübertragung. Die einzelnen Schichten sind dabei fest miteinander verbunden, d.h. die Verformungen sind in jeder Einzelschicht gleich groß. Dabei sind die einzelnen Schichten homogen, meist anisotrop, können unterschiedlich dick sein und unterschiedliche Orientierungen für Fasermaterialien und Anordnungen aufweisen. Den iterativen Berechnungsablauf zeigt **Abb. 3-14**.

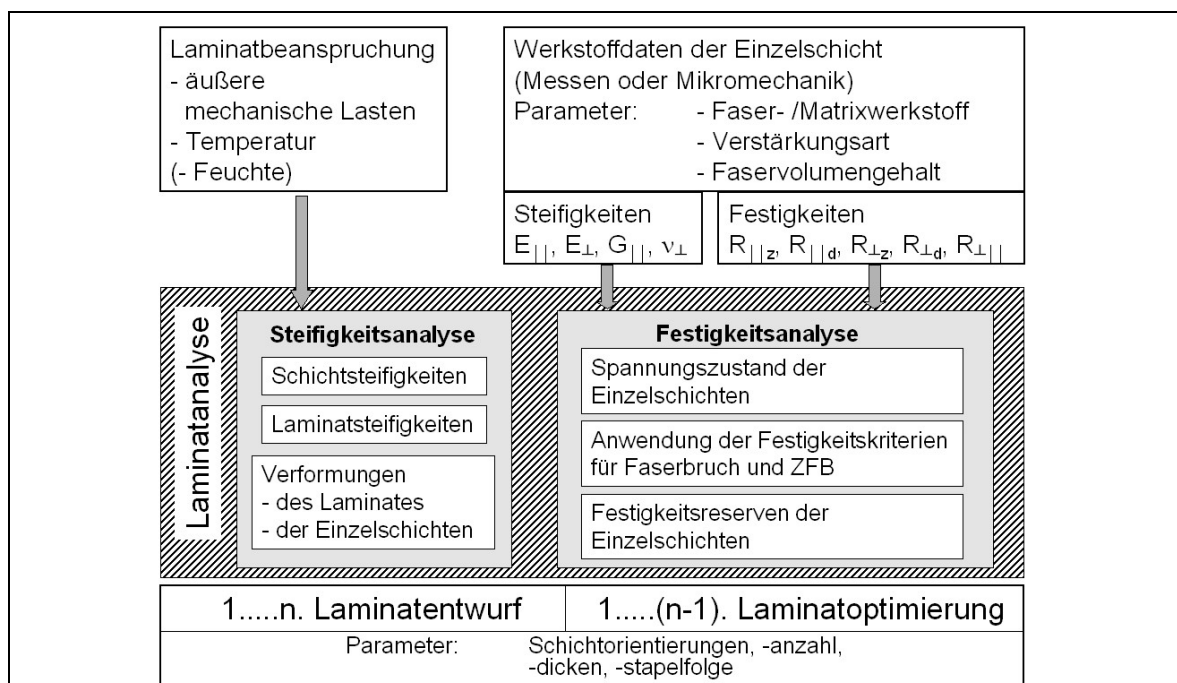


Abb. 3-14: Iterativer Berechnungsablauf der CLT [MIC95, S. 38]

3.6 Numerische Berechnungsmethoden / FEM

Die FEM ermöglicht die Berechnung von komplexen Bauteilen über die Diskretisierung in möglichst kleine Elemente, für die jeweils die angreifenden Kräfte, Verformungen und Spannungen durch die Lösung eines Differenzialgleichungssystems berechnet werden. Die verwendeten Elemente können unterschiedlich komplex sein und unterscheiden sich prinzipiell in der Genauigkeit zur exakten analytischen Lösung. Auch die Größe der Elemente hat einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit. Je kleiner die Elemente sind, desto genauer kann ein komplexes Bauteil modelliert und berechnet werden. Für räumliche Bauteile sind Schalen- oder Volumenelemente möglich. Schalenelemente sind bei dünnwandigen, komplexen Bauteilen besonders günstig und berücksichtigen dabei einen zweiachsigen Spannungszustand der Elemente. Volumenelemente sind für massive Bauteile hoher Wandstärke geeignet und ermöglichen die Berechnung drei- dimensionaler Spannungszustände.

Kunststoffe zeigen im unverstärkten Zustand ein von der Temperatur und der Zeit abhängiges Dehnungsverhalten ohne ausgeprägten linear- elastischen Bereich. Weiterhin sind teilkristalline Kunststoffe nicht isotrop. Faserverstärkte Kunststoffe haben häufig ein orthotropes Werkstoffverhalten (vgl. Abb. 3-8).

Liegt weder linear- elastisches noch isotropes Verhalten des Werkstoffs vor, muss für jedes einzelne finite Element ein bestimmtes richtungsabhängiges Verhalten definiert werden. Das ist, sofern dies manuell durchgeführt werden muss, ein extrem zeitaufwendiger Vorgang. Eine geringfügige Vereinfachung kann über die Gruppierung von nebeneinander liegenden finiten Elementen gleicher Orthotropierichtung über die Definition eines zusammenhängenden Flächenstücks erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit ist, die Richtungsabhängigkeiten der einzelnen finiten Elemente automatisiert zuzuweisen. Dies ist z.B. bei faserverstärkten Spritzgussteilen durch Ausnutzung der Ergebnisse von Füllbildsimulationen möglich. Im Allgemeinen richten sich die Fasern während des Formfüllvorganges entlang der Bewegungsrichtung der Schmelze aus. Über die gespeicherten Geschwindigkeitsvektoren der Fließfront bzw. der Schmelze kann der Rückschluss auf die Orthotropierichtung für jedes einzelne finite Element automatisiert erfolgen. Dennoch ist das Modell, welches mit der FEM für die

Berechnung von faserverstärkten Bauteilen modelliert wird, stets mit Ungenauigkeiten behaftet. Die Ergebnisse müssen daher durch praktische Versuche verifiziert werden.

Eine Vereinfachung ergibt sich bei der Berechnung von endlosfaserverstärkten Bauteilen mit der FEM dadurch, dass bei dem Vorliegen nur geringer elastischer Verformungen zunächst ein isotropes Werkstoffverhalten unterstellt wird. Im zweiten Schritt muss dann geprüft werden, ob die Orthotropierichtung des Faserverbundes mit der Richtung der Hauptnormalspannungen zusammenfällt. Ist dies nicht der Fall, muss überprüft werden, wie groß die Winkelabweichung zwischen Faserverstärkung und Hauptnormalkraftrichtung ist. Mit Hilfe von Laminatproben, die im Zugversuch geprüft werden, kann in Abhängigkeit von der Winkelabweichung das Werkstoffverhalten bestimmt werden und der Rückschluss erfolgen, ob ausreichende Festigkeitsreserven vorhanden sind.

4 Konzeption und Gestaltung

4.1 Lösungsansätze

4.1.1 Kräfte beim Umlagerungsvorgang

Der Umlagerungsvorgang mit einem Tuch findet im medizinischen Bereich sehr häufig Verwendung. Dabei ist zu beobachten, dass das Personal im vorne über gebeugtem Zustand das Patientengewicht aufnehmen muss. Diese unergonomische Haltung bedingt sehr hohe Belastungen der Wirbelsäule im Lendenwirbelbereich.

Eine Abschätzung der Kraftverteilung beim Umlagerungsvorgang mit einem Tragetuch zeigt **Abb. 4-1**.

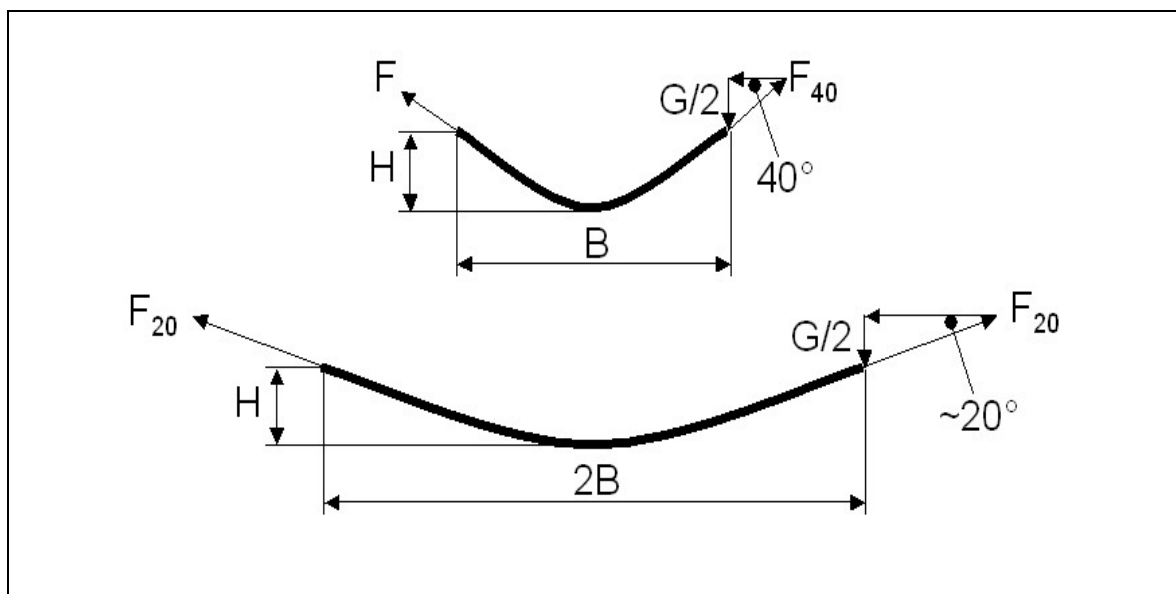


Abb. 4-1: Abschätzung der Kräfteverteilung beim Umlagern mit dem Tragetuch

Der obere Teil der Skizze in Abb. 4-1 stellt den Grundzustand dar, bei dem der Kraftangriffspunkt ca. 40° zur Waagerechten beträgt (vgl. Abb. 2-2). Die Gewichtskraft G des Patienten wirkt dabei in senkrechter Richtung nach unten.

Die durch das Personal auf jeder Seite aufzuwendende Zugkraft ist als F bezeichnet, sie verläuft in tangentialer Richtung zum Tuchende und ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht. Das Verhältnis zwischen der je Seite wirksamen halben Gewichtskraft und der durch das Personal aufzuwendenden Kraft beträgt für einen Winkel von 40° :

$$\sin 40^\circ = \frac{G/2}{F_{40}} = 0,64 \Rightarrow F_{40} = 1,56 \cdot \frac{G}{2} . \quad \text{Gl. 4-1}$$

Das bedeutet, dass das medizinische Personal auf jeder Seite mit wesentlich mehr als dem halben Patientengewicht belastet ist.

In dem unteren Teil der Abb. 4-1 ist der Abstand zwischen den Kraftangriffspunkten auf $2 \cdot B$ verdoppelt, wobei die maximale Durchsenkung konstant bleibt. Der Kraftangriffswinkel beträgt nun ca. 20° . Das Verhältnis zwischen der halben Gewichtskraft und der notwendigen Zugkraft beträgt dann für einen Winkel von 20° rechnerisch:

$$\sin 20^\circ = \frac{G/2}{F_{20}} = 0,34 \Rightarrow F_{20} = 2,92 \cdot \frac{G}{2} \Rightarrow \frac{F_{20}}{F_{40}} = 1,87 . \quad \text{Gl. 4-2}$$

Die Abb. 4-1 dient zwar nur als Abschätzung, zeigt aber auf, dass sich bei geringer Vergrößerung des Abstandes zwischen den Kraftangriffspunkten eine deutliche Steigerung der durch das Personal aufzuwendenden Zugkräfte ergibt. Es ist weiterhin zu folgern, dass es für das medizinische Personal unmöglich ist, den Patienten nur am Kopf- oder Fußbereich anzuheben, da bei maximal möglicher Kraft des Personals eine zu große Durchsenkung im Beckenbereich des Patienten entstehen würde. Aus diesem Grund erfolgt die Umlagerung immer quer zum Patienten bzw. zum Bett oder zur CT-Liege.

Der Kraftangriffswinkel ist bei einem Tragetuch stark von dem Abstand der Kraftangriffspunkte abhängig. Von diesem Winkel hängt wiederum die Zugkraft über die Funktion $(\sin \alpha)^{-1}$ ab. Statt des Tuches ist auch die Verwendung einer biegesteifen Auflage möglich. Dabei ist der Kraftangriffswinkel unabhängig von dem Abstand zwischen den Kraftangriffspunkten. Dadurch ergibt sich eine andere Kraftverteilung, **Abb. 4-2**.

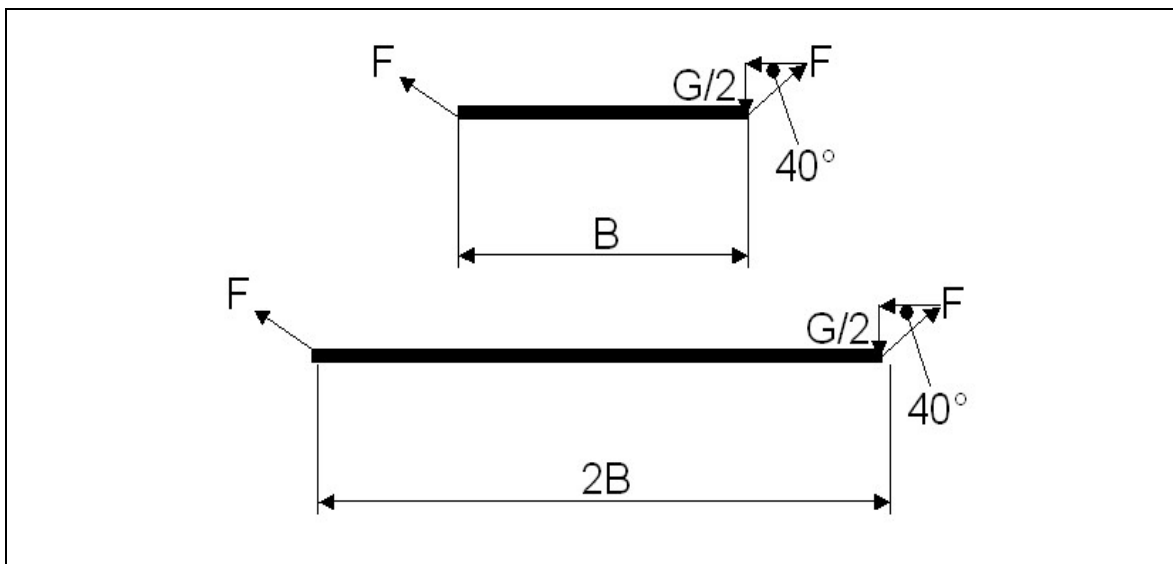


Abb. 4-2: Abschätzung der Kräfteverteilung beim Halten eines Brettes

Die Richtung der Kraft orientiert sich nur noch nach der Position bzw. dem Abstand des Personals zur Auflage. Generell ist es dadurch theoretisch möglich, den Patienten durch Halten am Kopf- und Fußende mit Hilfe von zwei oder vier Personen umzubetten. Vorschläge dazu finden sich in Kap. 2.5.3.

4.1.2 Berechnung eines Sandwichbauteils

Sandwichbauteile weisen im Allgemeinen ein besonders günstiges Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht auf. Es muss daher überprüft werden, ob sie für den gegebenen Anwendungsfall geeignet sind. Es erfolgt die Herleitung der Beziehung aus Werkstofffestigkeit und Gewicht für einen einfachen Probekörper nach **Abb. 4-3** mit einer Länge von 1950 mm und einer Breite von 400 mm. Er besteht aus einem stützenden Schaumkern und einer tragenden Hülle, die zwei unterschiedliche Belegungen aufweisen kann. Er wird nur am Kopf- und Fußende aufgelagert und mit einer Punktlast von 6000 N in der Mitte belastet.

Das maximale Biegemoment in der Mitte dieses Probekörpers ergibt sich zu:

$$M_{b, \max} = \frac{F}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{m \cdot g}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{m \cdot g \cdot l}{4} . \quad \text{Gl. 4-3}$$

Mit: m: Masse der aufgebrachten Punktlast in kg
 g: Erdbeschleunigung = 9,81 m/s²

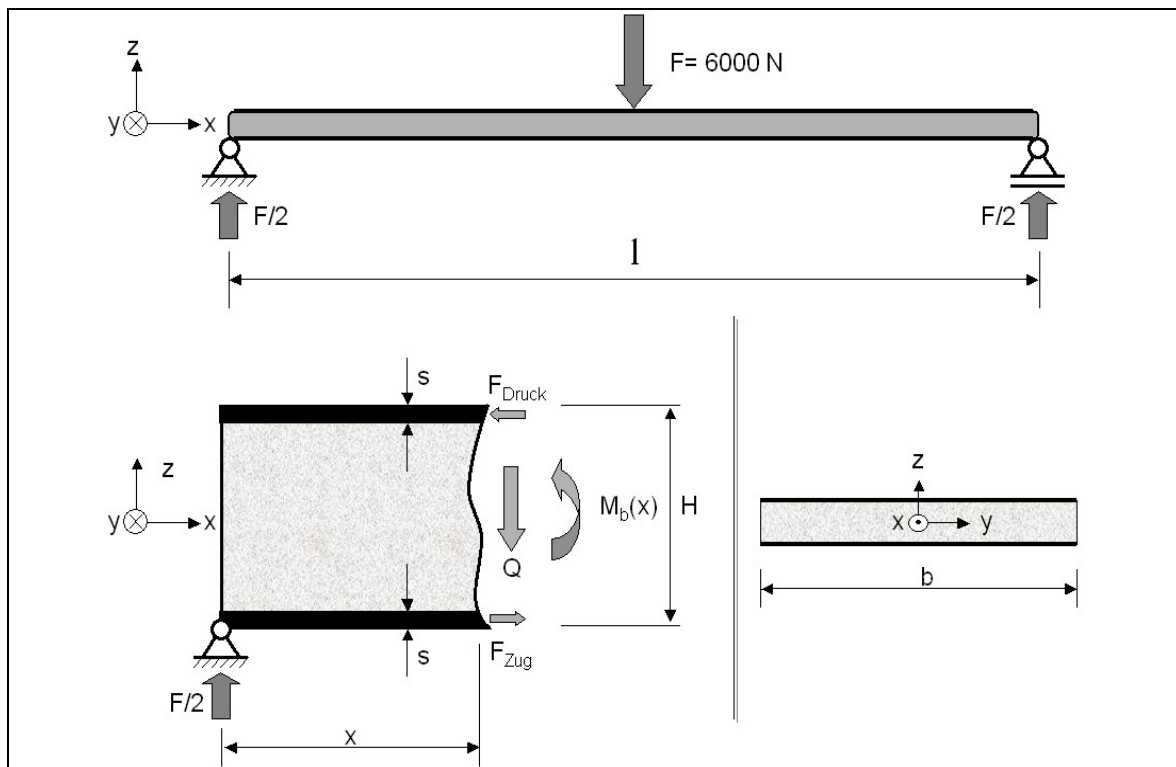


Abb. 4-3: An Kopf- und Fußende aufgelagerter Probekörper; oben: Seitenansicht, unten links: Freischnitt in x- Richtung, unten rechts: Querschnitt

Dieses Moment muss über die relativ dünne Hülle übertragen werden, der Schaumkern stützt bei Druck nur gegen Knickung. Wird diese Hülle in der y, z- Ebene geschnitten, so ergibt sich der tragende Hohlprofilquerschnitt, für den das Flächenträgheitsmoment berechnet werden kann. Das gegebene Profil weist ein Verhältnis von Breite zu Höhe von mehr als 10 auf. Der Anteil der Seitenbereiche am Flächenträgheitsmoment lässt sich daher vernachlässigen. In vereinfachter (und sicherer) Betrachtung müssen nur die Ober- und Unterseiten für das Flächenträgheitsmoment berücksichtigt werden, **Abb. 4-4**.

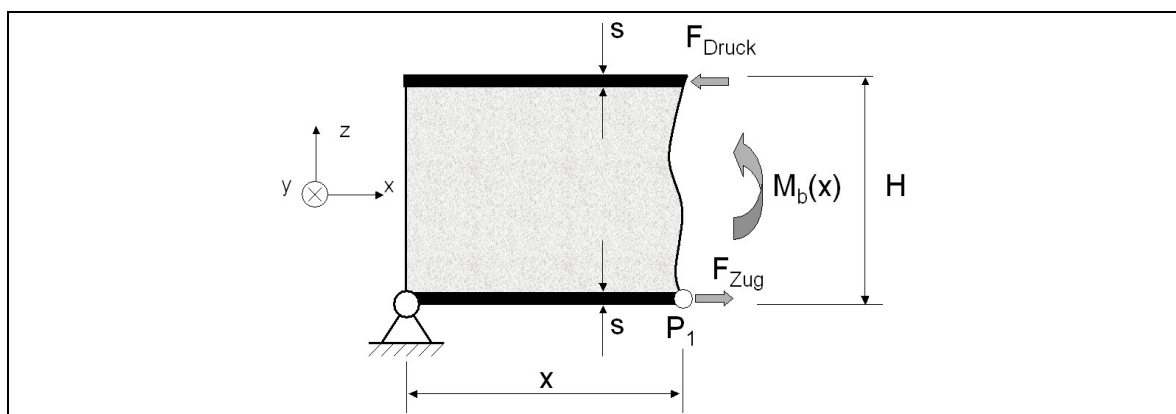


Abb. 4-4: Freigeschnittener Probekörper

Durch diese Annahme ergeben sich unter Berücksichtigung der inneren Kräfte und der Gl. 4-3 die Zug- und Druckkräfte auf der Unter- bzw. Oberseite zu:

$$\sum M_{p1} = M_b(x) + F_{\text{Druck}}(x) \cdot (H - s) = 0 \quad \text{Gl. 4-4}$$

$$\Rightarrow F_{\text{Zug}}(x) = \frac{M_b(x)}{H - s}; F_{\text{Druck}}(x) = -\frac{M_b(x)}{H - s}; |F_{\text{Zug, Druck, max}}| = \frac{M_{b, \max}(x)}{H - s} = \frac{F \cdot l}{4 \cdot (H - s)}.$$

Mit: M_b : Biegemoment in Nm
 H: Bauteilhöhe (außen) in mm
 s: Wandstärke der Außenhülle

Mit gegebener tragender Breite von 40 cm und unter Berücksichtigung, dass der Schaumkern nur stützende Funktion hat, ergibt sich die minimal notwendige Wandstärke der Außenhülle zu:

$$s_{\text{oben, unten, min}} = \frac{|F_{\text{Zug, Druck, max}}|}{b \cdot \sigma_{\text{zul}}} = \frac{F \cdot l}{4 \cdot (H - s) \cdot b \cdot \sigma_{\text{zul}}}. \quad \text{Gl. 4-5}$$

Mit: $F_{\text{Zug, Druck, max}}$: Kraft infolge maximalem Biegemoment auf Ober- bzw. Unterseite in N
 b: Bauteilbreite in mm
 σ_{zul} : Zulässige Werkstoffspannung in N / mm²
 (Werte für Holmgurte z.B. nach [IDA88, S. 9 oder S.19])

Mit diesen Werten kann das Bauteilgewicht über der zulässigen Spannung in den kraftaufnehmenden Deckschichten unter Variation der Bauteilhöhe aufgetragen werden, **Abb. 4-5**. In der Berechnung wurde für den Hüllwerkstoff eine Dichte von 1,47 g/cm³ und für den Schaumkern eine Dichte von 0,04 g/cm³ verwendet. Das Diagramm zeigt insgesamt acht verschiedene Kurven. Variiert wurde die Bauteilhöhe in vier Schritten von 35 bis 65 mm unter Verwendung zweier Belegungsvarianten:

- Bei Variante 1 ist die Hülle aus reinem UD- Laminat (vgl. Kap. 3.1.1.4) aufgebaut, welches eine Faserorientierung in Längsrichtung aufweist.
- Die Variante 2 berücksichtigt, dass das Bauteil eine Grundbelegung mit einem (0°/90°)- Gewebe aufweist und in Längsrichtung mit UD- Gelege verstärkt wird. Dies entspricht einer sehr praxisnahen Ausführung, da mit dieser Belegung auch die in Querrichtung vorhandenen Kräfte aufgenommen werden können.

Durch die Abb. 4-5 lassen sich mehrere grundsätzliche Aussagen treffen:

- Je höher die Festigkeit des Werkstoffes der Deckschichten ist, desto geringer wird das Gesamtgewicht des Probekörpers bei gegebener Höhe ausfallen.
- Ein Gesamtgewicht des Probekörpers von unter 70 N kann auch bei geringer Werkstofffestigkeit von ca. 100 N/mm² immer erreicht werden. Es zeigt sich dabei ein geringer positiver Einfluss der Gesamthöhe auf das Gewicht.
- Bei der Verwendung von Deckschichtwerkstoffen, die eine Festigkeit unter 50 N/mm² besitzen, ist durch die Erhöhung der Bauteilhöhe eine deutliche absolute Verringerung des Gesamtgewichtes des Probekörpers erreichbar.

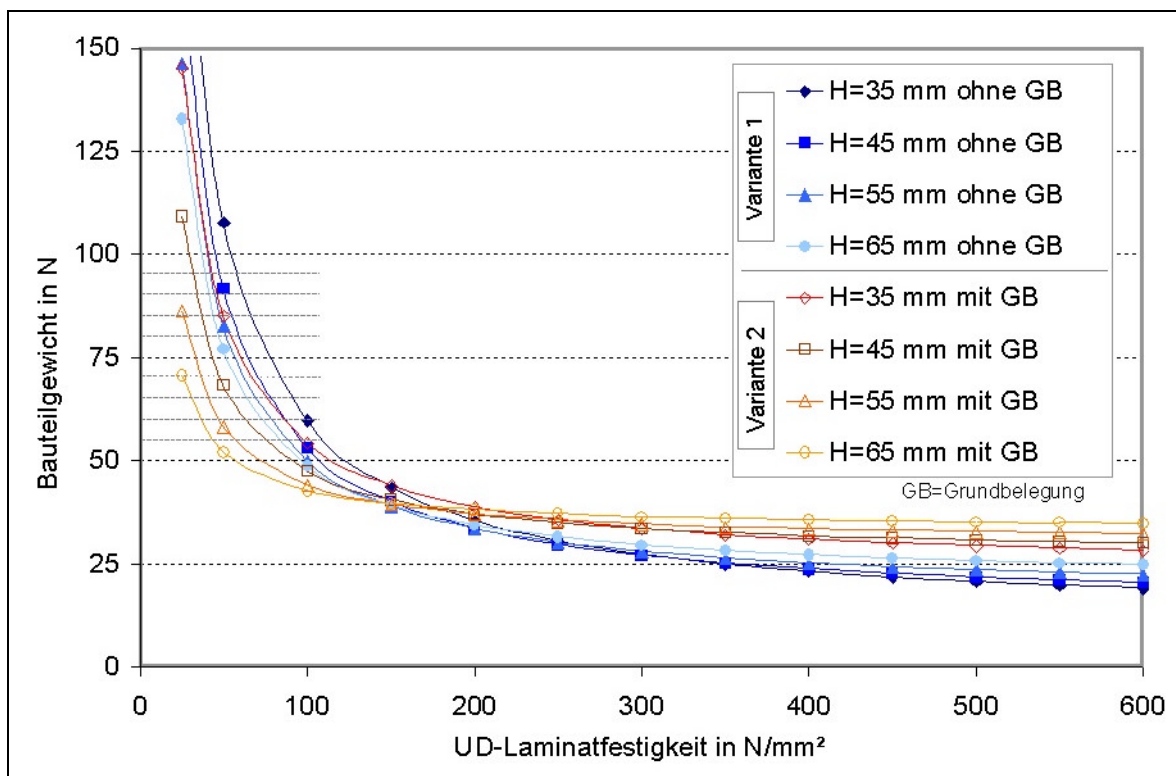


Abb. 4-5: Gesamtgewicht für einen Probekörper nach Abb. 4-3 in Abhängigkeit des Festigkeitswertes des Hüllwerkstoffes unter Variation der Bauteilhöhe und der Belegung

- Bei der Verwendung von Deckschichtwerkstoffen, die eine Festigkeit über 250 N/mm² besitzen, ist ein geringeres Gesamtgewicht bei niedrigerer Bauteilhöhe zu erwarten, wobei der Festigkeitseinfluss bei konstanter Dicke auf das Bauteilgewicht sehr gering ist.

- Werden bei der Variante 1 oder 2 Festigkeiten zwischen 180 N/mm² und 220 N/mm² angesetzt, ist das Gesamtgewicht nahezu unabhängig von der Bauteilhöhe.

Wandstärke

Die äquivalente, massive Gesamtdicke des Probekörpers für die Durchstrahlung ergibt sich, wenn die Wandstärken von Ober- und Unterseite sowie die Höhe des Kernwerkstoffes, gerechnet als massive Platte ohne Poreneinschlüsse, summiert werden. Die massive Dicke sollte möglichst gering sein, da sie entscheidend für die Schwächung der Röntgenstrahlung ist. Dies gewährleistet einen hohen Kontrast des Röntgenbildes. Die Wandstärke nimmt mit steigender Festigkeit der Außenhülle ab. Die Grenze bildet die minimal notwendige Dicke der Außenhülle, die ausreichenden Schutz gegen Knickung bietet und stoß- und beulfest ist. Diese Belastungszustände sind bei ungestützten, dünnwandigen Hohlstrukturen in der Regel der limitierende Faktor.

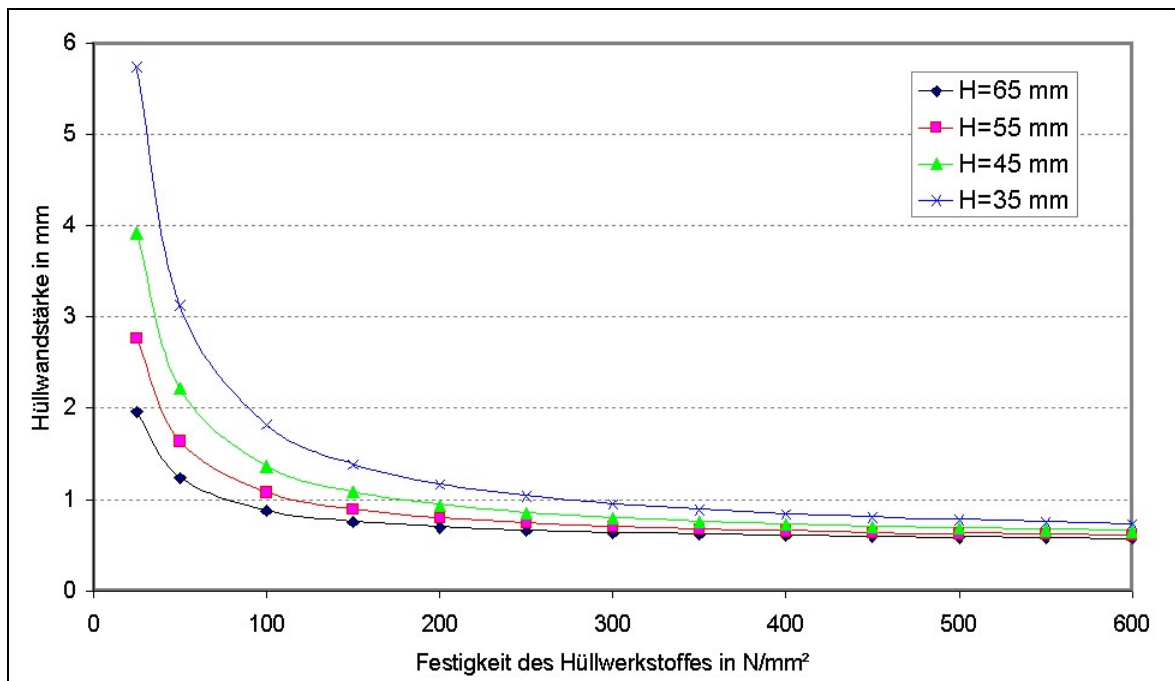


Abb. 4-6: Wandstärken des Hüllwerkstoffes für einen Probekörper nach Abb. 4-3 in Abhängigkeit des Festigkeitswertes unter Variation der Bauteilhöhe (Knickung nicht berücksichtigt)

Durch die Verwendung von Stützkernen wird die Beul- und Knickfestigkeit wesentlich verbessert bzw. erst ermöglicht. Die Wandstärke der tragenden Hülle kann in Abhängigkeit der Festigkeit des verwendeten Werkstoffes angegeben werden, **Abb. 4-6**.

Die massive Gesamtdicke des Probekörpers ergibt sich durch Addition der massiven Dicke des Schaumkernwerkstoffes, die je nach Schaumdichte zwischen 1 und 2 mm liegt, und der Dicke der Hülle. Bei einer Bauteilhöhe von 35 mm beträgt die Dicke der Hülle je 1 mm auf Ober- und Unterseite für einen Festigkeitswert des Hüllwerkstoffes von 250 N/mm². Die minimale massive Gesamtdicke beträgt daher etwa 3,5 mm. Bei einer evtl. notwendigen Steigerung der Knicksicherheit muss diese allerdings erhöht werden.

4.1.3 Vergleich und Berechnung von dünnen Profilen

Das Flächenträgheitsmoment kann bei geringfügig steigendem Gewicht nicht nur durch die Verwendung eines Sandwichelementes, sondern auch durch die Profilierung dünnwandiger Elemente oder das Anbringen von Rippen entscheidend erhöht werden. Es ist daher zu überprüfen, ob mit offenen oder geschlossenen Profilen eine geeignete Lösung für das Liegenelement des Auflagesystems gefunden werden kann, wobei als Belastung eine mittig angreifende Kraft von 6000 N und ein maximales Eigengewicht von 80 N verwendet wird. Es folgt nun für diese Werte eine Abschätzung der Wandstärken und eine Berechnung der zu erwartenden Gewichte.

Zunächst wird die Verwendung einer planen massiven Platte angenommen, die als Biegebalken berechnet wird. Die Durchsenkung eines Biegebalkens in der Mitte bei gelenkiger Lagerung an seinen beiden Endpunkten ergibt sich zu:

$$w_{\max} = \frac{F \cdot l^3}{48 E \cdot I} \quad \text{Gl. 4-6}$$

- Mit:
- F: Kraft in N mit Kraftangriffspunkt in der Mitte
 - E: Elastizitätsmodul in N/mm²
 - I: Flächenträgheitsmoment in mm⁴
 - l: Freie Biegelänge

Das Flächenträgheitsmoment beträgt für rechteckige Querschnitte:

$$I = \frac{b \cdot H^3}{12} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Mit: b: Breite des Rechteckprofils in mm

H: Höhe des Rechteckprofils in mm

I: Flächenträgheitsmoment in mm⁴

Die maximale Biegespannung beträgt allgemein:

$$\sigma_{b, \max} = \frac{M_b}{I} \cdot z_{\max} \quad \text{Gl. 4-8}$$

Mit: M_b: Biegemoment in Nm

z_{max}: Maximaler Abstand von der neutralen Faser in mm

I: Flächenträgheitsmoment in mm⁴

Die maximale Durchsenkung kann unter Verwendung der Werkstoffkennwerte von handelsüblichen CFK- Platten (Gewebe- prepreg nach [RUG02, S. 199]) über der gewählten Plattenstärke unter Variation der mittig angreifenden Last dargestellt werden, **Abb. 4-7**.

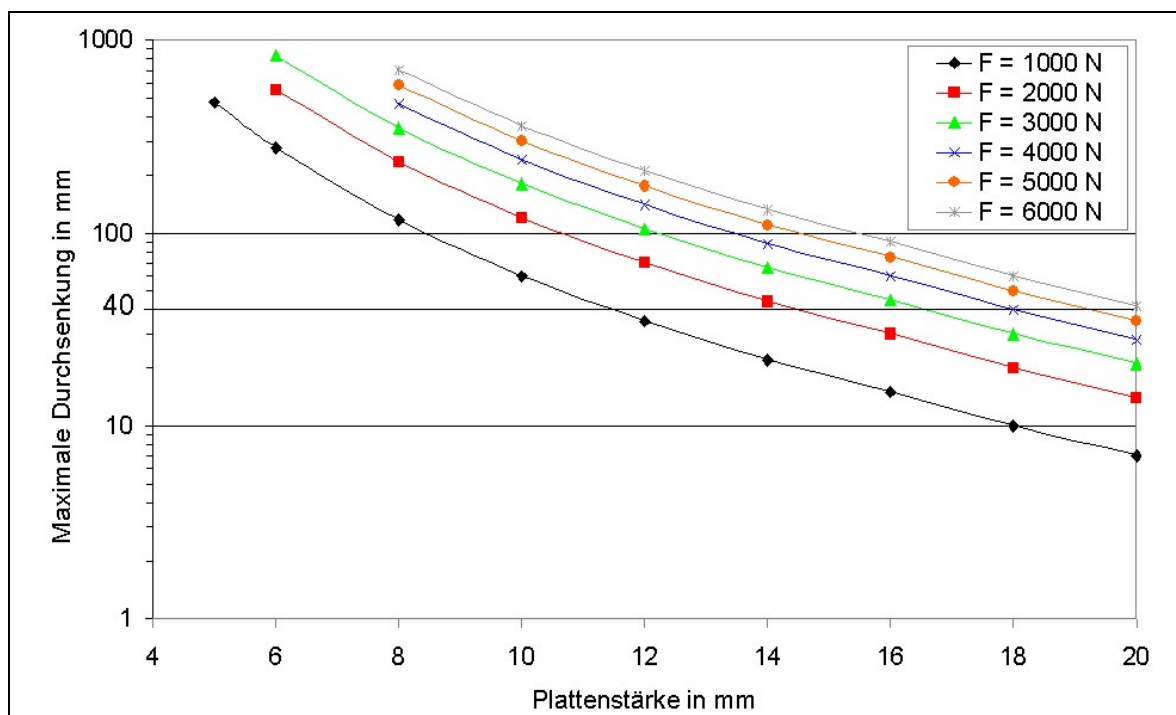


Abb. 4-7: Maximale Durchsenkung in Abhängigkeit der CFK- Gewebe- Laminatstärke unter Variation der Last

Ein 6 mm starkes CFK- Gewebelaminat kann rein rechnerisch eine mittig aufgebrachte Last von 6000 N ertragen, verformt sich aber viel zu stark. Eine akzeptable Durchsenkung von unter 40 mm bei Belastung mit 6000 N ist erst bei einer Plattenstärke von etwa 20 mm erreicht. Bei Belastung mit 1000 N wird eine Dicke von 12 mm benötigt. Diese Platte verursacht Halbzeugkosten oberhalb von 1500 EUR [RGP02, S. 54]. Für ein Eigengewicht unterhalb von 80 N ergibt sich bei einer Breite von 500 mm und einer Länge von 1950 mm eine maximale Dicke von nur 5,2 mm. Das Beispiel zeigt, dass mit einer massiven unprofilierten Platte keine technisch geeignete und bezüglich der Kosten vertretbare Lösung gefunden werden kann. Im Folgenden werden daher profilierte Varianten betrachtet.

Die Grundform des Liegenelementes lässt sich aus den in Kap. 2.6 und Kap. 2.7.2 beschriebenen Abmessungen ableiten. **Abb. 4-8** zeigt ausgewählte mögliche Varianten.

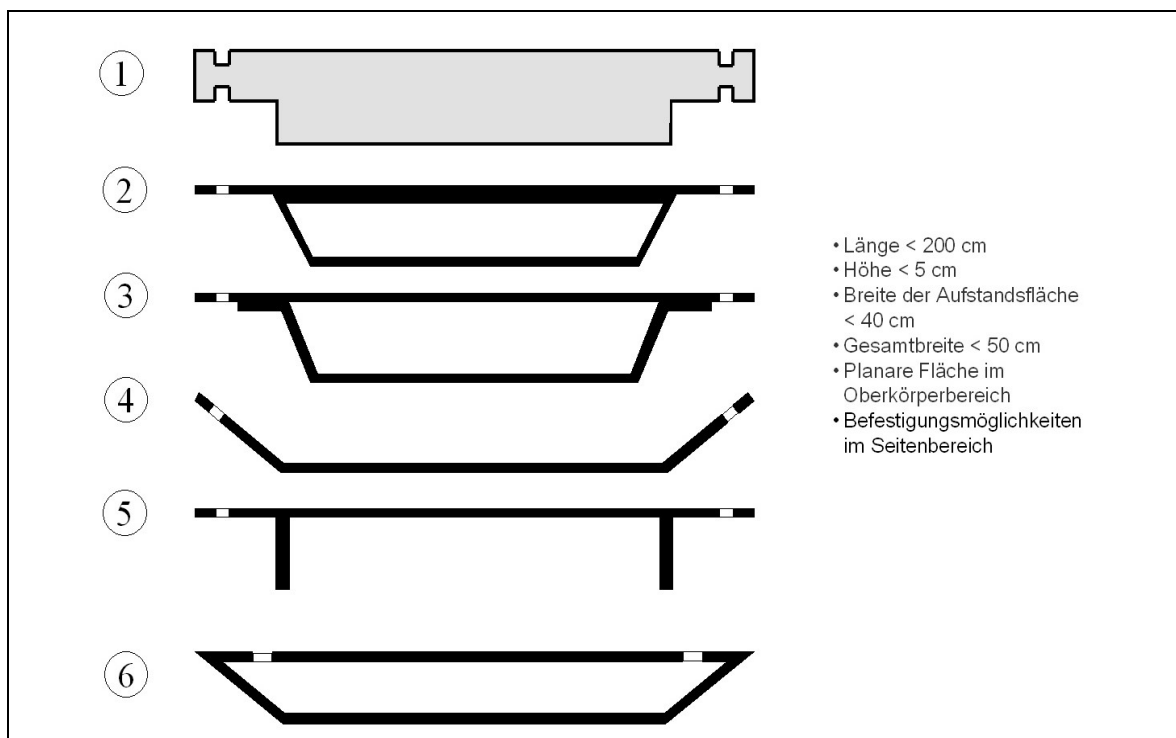


Abb. 4-8: Mögliche Grundformen des Liegenelementes im Querschnitt

Die Variante 1 stellt im Vergleich zu den anderen Lösungen den möglichen Querschnitt eines Sandwichelementes dar. Die dafür notwendige Wandstärke wurde bereits in Kap. 4.1.2 abgeschätzt und beträgt theoretisch weniger als 1 mm (vgl. Abb. 4-6). Der im Inneren befindliche Stützkern besitzt ein Gewicht von etwa 1,5 kg.

Die Varianten 2 bis 6 entstehen aus einfachen Profilkörpern. Mit Ausnahme von Variante 4 bieten alle Profile auf der Oberseite eine maximale Auflagebreite von 500 mm.

Grundsätzlich sind offene und geschlossene Profile möglich. Diese können miteinander verbunden werden, um ein höheres Flächenträgheitsmoment zu erreichen. Der Vorteil des offenen Profils liegt in der einfachen Fertigung ohne Kern.

Variante 2 entsteht durch Fügen eines Hohlprofils und einer Platte, wobei in der Mitte eine unnötige Werkstoffanhäufung entsteht. Günstig ist die große Verbindungsfläche zwischen beiden Elementen. Für eine Wandstärke von 1,9 mm wird bei diesem Profil das Gewicht 80 N erreicht. Dieser Wert ist für eine ausreichende Steifigkeit der außen liegenden Funktionsbereiche zu gering. Die Knicksicherheit ist bei dieser Wandstärke voraussichtlich nicht gegeben (vgl. Variante 6).

Die Variante 3 vermindert die Werkstoffanhäufung der Variante 2 auf einen geringen Verbindungsbereich. Der äußere Funktionsbereich kann durch die Verlängerung des Verbindungsbereiches der beiden Elemente bis zur Außenkante gestärkt werden. Um das Zielgewicht von 80 N einzuhalten, darf die Wandstärke nicht mehr als 2,5 mm betragen. Auch diese Wandstärke ergibt keine Knicksicherheit (vgl. Variante 6).

Eine bezüglich Steifigkeit, Festigkeit, Artefakten und Kosten günstige Lösung ist nach Abb. 4-8 die Variante 4. Hier können konstante Wandstärken in senkrechter Richtung produziert werden und die Fertigung ist z.B. mit Hilfe eines Umformvorganges möglich. Durch die Profilierung erhöht sich das Flächenträgheitsmoment je nach Breite der horizontalen Liegefläche um den Faktor 60 bis 100 gegenüber der planen Platte, wenn eine Breite von 500 mm, eine Höhe von 50 mm und eine Plattenstärke von 5 mm als Ausgangsgrößen vorausgesetzt werden. Damit verringert sich auch die Durchsenkung nach Gl. 4-6 und die Spannung nach Gl. 4-8 entsprechend ab. Ein 5 mm starkes CFK- Laminat (Werkstoffkennwert für CFK- Gewebeprepreg nach [RUG02, S. 199]) ist nach Gl. 4-6 bis Gl. 4-8 für die geforderte Festigkeit und Steifigkeit ausreichend und erfüllt die Gewichtsanforderungen. Eine numerische Abschätzung der

Knicksicherheit mit Hilfe der FEM ergab allerdings für das gewählte Laminat und die Wandstärke von 5 mm einen Sicherheitsfaktor noch unterhalb von 1 (vgl. Variante 6). Erst für eine Wandstärke von etwa 6 mm ist mit einer ausreichenden Knicksicherheit zu rechnen. Ergonomisch ungünstig an dieser Variante ist der Seitenbereich, der zu Druckstellen beim Patienten führen kann. Je flacher der Seitenbereich ansteigt, desto kleiner ist die verbleibende plane Liegefläche. Falls bei dieser Variante gefräste Öffnungen als Griffe verwendet werden, müssen deren Kanten aufgepolstert werden, da diese beim Tragen sonst in die Hand einschneiden. Die Befestigung von Anbauteilen ist im Seitenbereich aufgrund der Schräge aufwändiger und deren Steifigkeit gering.

Sehr steile oder senkrechte Flanken führen bei senkrechter Durchstrahlungsrichtung zu starken Artefakten auf dem Röntgenbild. Die Variante 5 würde diese Artefakte beim konventionellen Röntgen sehr ausgeprägt zeigen, da die massiven Aufstandsflanken, wie abgebildet, entlang der Längsseite des Liegenelementes verlaufen. Befinden sie sich nur quer an Kopf- und Fußende oder werden sie dort nur als Füße ausgeführt, ergeben sich beim konventionellen Röntgen keine punktuellen Artefakte. Im CT würden diese Bereiche evtl. im Schnittbild zum Tragen kommen. Das entscheidende Problem dieser möglichen Ausführung stellt die geforderte Steifigkeit dar. Da Aufstandsflanken an Kopf- und Fußende in der Mitte der Auflagefläche nicht zum Flächenträgheitsmoment beitragen, muss die obere Platte eigensteif und damit, wie oben bereits gezeigt, dick sein. Alternativ kann in der Mitte ein weiterer Auflagerungspunkt vorhanden sein, der bei günstiger Wahl außerhalb des Durchstrahlungsbereiches beim konventionellen Röntgen liegt. Eine Plattenstärke von 8 mm würde in diesem Fall ausreichen. Diese verursacht allerdings zu hohe Werkstoffkosten und ein zu hohes Gewicht von etwa 120 N.

Die Variante 6 ist aufwändiger in der Fertigung als die Varianten 3 und 4, da hier z.B. ein Wickelverfahren notwendig ist. Um die Gewichtsanforderungen zu erfüllen, darf die Wandstärke 2,5 mm nicht überschreiten. Beispielhaft wurde für dieses Profil mit Hilfe der FEM eine Knickanalyse durchgeführt, **Abb. 4-9**. Es wurde der kritische Lastfaktor für drei E-Moduln und zwei Belastungszustände in Abhängigkeit der Wandstärke berechnet, wobei die Außenkontur stets konstant blieb.

Der kritische Lastfaktor lässt sich über folgende Beziehung beschreiben:

$$LF_{\text{krit}, i} = \frac{F_{\text{zul}, i}}{F_{\text{vorh}}}$$

Gl. 4-9

Mit: F_{zul} : Maximal zulässige Kraft bevor Beulen eintritt
 F_{vorh} : Kraft, mit der die Simulation durchgeführt wurde
i: Nummer der Schwingungsform

Als erste Belastung wurde eine in der Mitte des Profils angreifende Punktlast von 6000 N verwendet. Die zweite Belastung ist eine Streckenlast von 4103 N/m (8000 N / 1,95 m). Für die Simulation wurde die Variante 6 außerdem mit Rundungsradien versehen, Abb. 4-9. Es ergibt sich für beide Belastungszustände und E- Moduln bei einer Wandstärke von 2,5 mm ein kritischer Lastfaktor von deutlich unter 1. Erst für eine Wandstärke von etwa 4 mm und hohem E- Modul, der nur durch überwiegende UD- Faserorientierung erreicht werden kann, ergeben sich Werte oberhalb von 1.

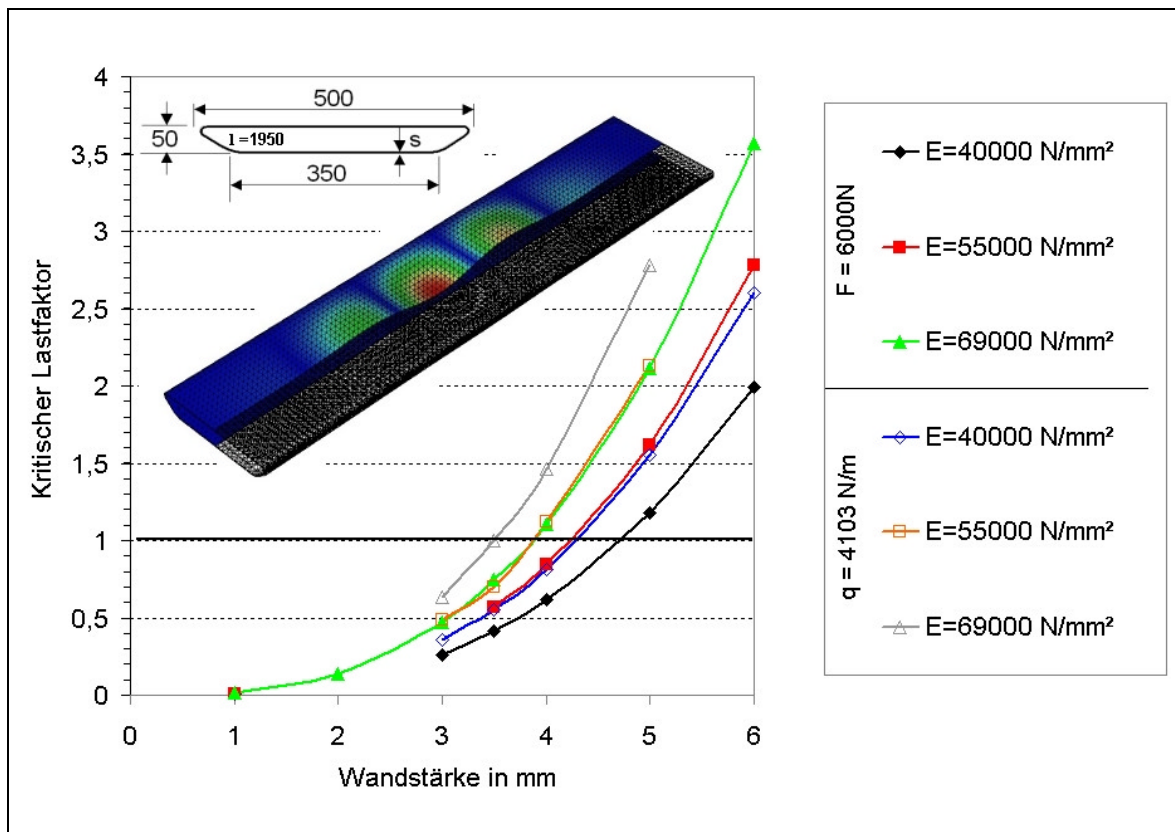


Abb. 4-9: FEM- Knickanalyse der Variante 6 nach Abb. 4-8 (Schalen mit EG=25 mm, $l=1950$ mm)

Die numerische Simulation der Knicksicherheit mit Hilfe der FEM hat gezeigt, dass ein dünnwandiges Hohlprofil, das die Gewichtsanforderungen noch erfüllt,

ohne Abstützung durch einen innenliegenden Kern keine ausreichende Knicksicherheit besitzt. Die Verwendung eines offenen Profils nach Variante 4 ist u. U. möglich, besitzt aber ergonomische Nachteile.

Die technisch günstigste Lösung ist die Sandwichstruktur, da diese den vorhandenen Werkstoff bezüglich Festigkeit, Steifigkeit, Knicksicherheit und Gewicht optimal ausnutzt und nur geringe Artefakte verursacht. Dabei ist in einfachster Ausführung ein Strangprofil ähnlich der Variante 6 möglich. Im Folgenden wird eine Weiterentwicklung dieser Lösung beschrieben, die die notwendigen Funktionsbereiche mit integriert.

4.1.4 Werkstoffkosten für CFK- Lamine

Die Werkstoffkosten von FKV- Bauteilen stellen insbesondere dann einen großen Anteil an den Herstellkosten dar, wenn als Verstärkungshalbzeug Kohlefasern verwendet werden. Es erfolgt daher in diesem Kapitel eine Darstellung der zu erwartenden Werkstoffkosten für CFK- Lamine am Beispiel des in Kap. 4.1.2 beschriebenen Probekörpers.

Die Kosten sind aus [RUG02] entnommen, wobei jeweils die günstigste Packungseinheit verwendet wurde. Die Kosten für Bestellmengen, die im Bereich der Serienfertigung benötigt werden, liegen darunter. Die angegebenen Werte sind daher als Obergrenze anzusehen.

Die Werkstoffkosten von dünnwandigen Leichtbaukonstruktionen sind bei Verwendung nur eines bestimmten Faserhalbzeuges direkt proportional von der Wandstärke abhängig. Eine Variation der Flächenmassen zur Erzielung größerer Wandstärken kann aber zu deutlich geringeren Werkstoffkosten führen, da bei Geweben mit der Zunahme der Flächenmasse der Preis nicht proportional ansteigt. Eine Übersicht zeigt **Abb. 4-10**.

Die Nettowerkstoffkosten pro m² bezogen auf 100 g/m² Flächenmasse fallen bei Geweben mit zunehmender Flächenmasse stark ab. Die dargestellten zwei Gelege-Typen sind in diesem Beispiel günstiger. Das liegt daran, dass der Webprozess als von der Flächenmasse nahezu unabhängiger (hoher) Faktor in den Kosten enthalten ist.

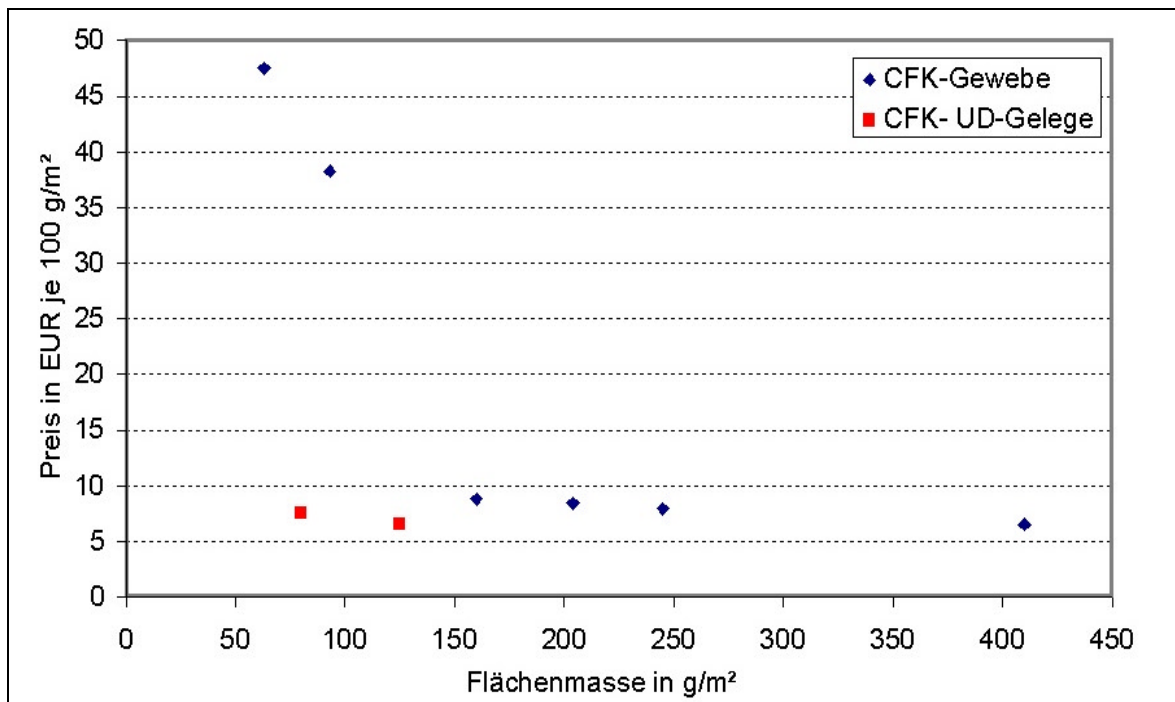


Abb. 4-10: Preise für Kohlefasergewebe und -gelege bezogen auf 100 g/m²
(Werte nach [RUG02])

Für ein Kunststoff- Verbund- System können unabhängig vom Faservolumengehalt zunächst die einzelnen Schichtdicken des notwendigen Faserwerkstoffs mit Hilfe der Netztheorie (vgl. Kap. 3.5.2.1) berechnet werden. Sind die Schichtdicken des Verstärkungsmaterials in den Raumrichtungen festgelegt, können daraus Varianten unter Verwendung unterschiedlicher Flächenmassen entwickelt werden. In der Regel sind die notwendigen Schichtstärken wesentlich größer als die Flächenmassen der Faserhalbzeuge. Deshalb werden die Faserlagen bis zur Überschreitung der notwendigen Höhe aufeinander laminiert. Dabei entstehen häufig geringe Überdimensionierungen.

Der Matrixanteil ergibt sich aus dem Faservolumengehalt, der im verwendeten Fertigungsverfahren erzielt wurde. Der Anteil der Matrix an den Werkstoffkosten ist insbesondere bei CFK- Laminaten relativ gering, **Abb. 4-11**.

Für Handlamine mit duromeren Matrixsystemen, die ein Faservolumengehalt von ca. 35 % erreichen, beträgt der relative Kostenanteil der Matrix bezüglich der dargestellten Werte weniger als 10 %. Verfahren die mit erhöhtem Druck arbeiten erreichen höhere Faservolumengehalte und damit niedrigere relative Matrixkosten.

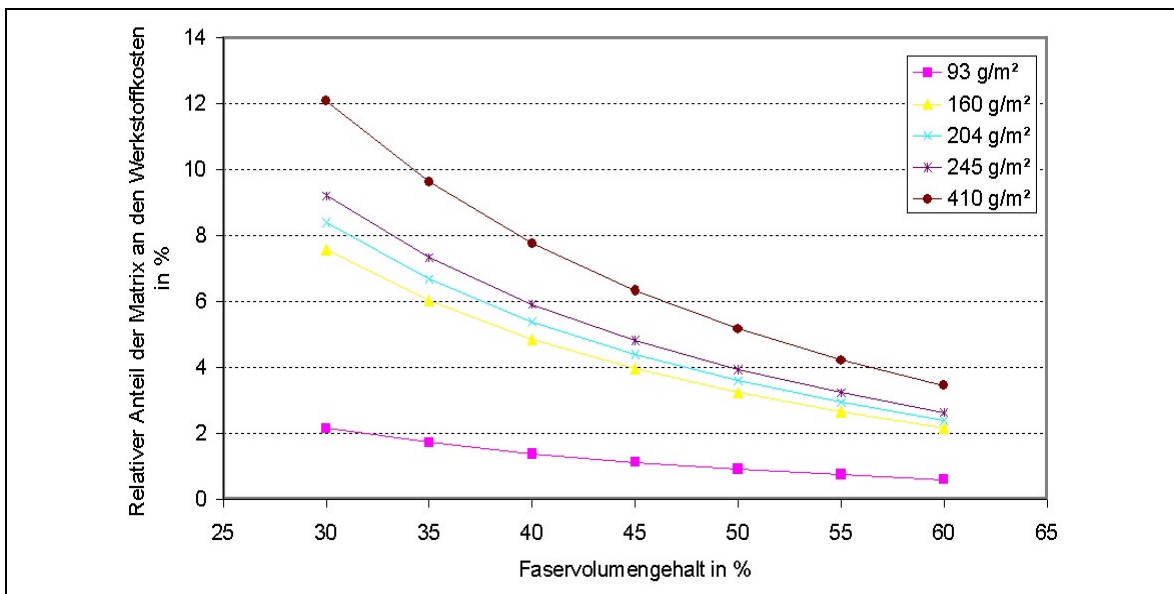


Abb. 4-11: Relativer Anteil der Matrix an den Laminatkosten unter Verwendung von CFK- Gewebhalbzeugen mit unterschiedlicher Flächenmasse in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes (Einzelwerte nach [RUG02])

Die Gesamtkosten des Laminatwerkstoffs setzen sich aus den Matrix- und den Faserhalbzeugkosten zusammen. Diese werden für unterschiedliche Halbzeugvarianten in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt dargestellt, **Abb. 4-12**.

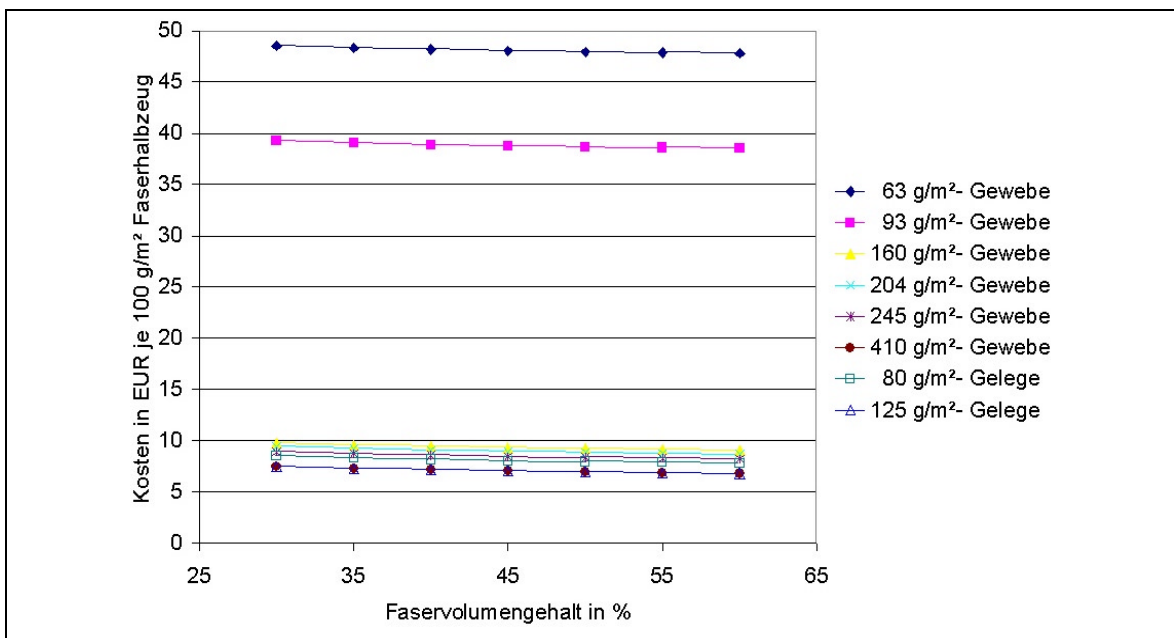


Abb. 4-12: Werkstoffkosten für CFK- Lamine (Bezugswerte nach [RUG02]) unter Verwendung unterschiedlicher Flächenmassen in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes

Die Darstellung erfolgt dabei bezogen auf eine Halbzeugflächenmasse von 100 g/m². Der Bezug auf diese Flächenmasse ermöglicht eine schnelle

Berechnung der Kosten von Laminatvarianten, bei denen die notwendige Dicke des Faserhalbzeugs bekannt ist.

Beispielsweise ergibt sich für eine UD- Laminat- Wandstärke von 1 mm und einen Faservolumengehalt von 35 % eine Faserdicke von 0,35 mm. Hieraus ergibt sich die Flächenmasse des CFK- Halbzeuges zu:

$$\begin{aligned}
 m &= V \cdot \rho \\
 \Rightarrow \text{Flächenmasse} &= \frac{m}{A} = \frac{V \cdot \rho}{A} = \frac{A \cdot H \cdot \rho}{A} = H \cdot \rho \\
 &= 0,35 \text{ mm} \cdot 1800 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 630 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} .
 \end{aligned}
 \qquad \text{Gl. 4-10}$$

Mit: m: Masse in kg
 V: Volumen in m³
 ρ: Dichte in g/cm³, hier: ρ_{CF} = 1800 g/cm³
 A: Fläche in m²
 H: Höhe des massiven Faserhalbzeugs in mm

Für den Probekörper nach Kap. 4.1.2 mit einer Oberfläche von ca. 2 m² erhält man damit für das Laminat der Hülle im optimalen Fall nach Abb. 4-12 einen Werkstoffpreis von unter 126 Euro. Höhere Wandstärken verhalten sich proportional dazu. Berücksichtigt werden muss aber, dass durch den schichtweisen Aufbau der notwendigen Wandstärke oder durch Verschnitt mehr Faserhalbzeug eingesetzt werden muss, wodurch die Kosten im zweistelligen Prozentbereich ansteigen. Im Vergleich zu einem Sandwichelement verursacht eine 5 mm starke und profilierte Platte nach Kap. 4.1.3 Variante 4 etwa die doppelten Laminatkosten. Die Fertigung dieser Variante ist aber wesentlich kostengünstiger.

Unabhängig vom Fertigungsverfahren ist damit gezeigt, dass auch bei Verwendung von CFK als Hüllwerkstoff für einen Probekörper nach Kap. 4.1.2 moderate Werkstoffkosten erreicht werden können.

4.1.5 Konstruktive Teillösungen des Liegenelementes

Verwenden einer selbsttragenden Konstruktion

Artefakte spielen insbesondere beim konventionellen Röntgen eine sehr wichtige Rolle. Es ist daher notwendig, konstant geringe Wandstärken in dem zu durchstrahlenden Bereich des Liegenelementes einzusetzen, um Artefakte auszuschließen. Das ergibt einen Zielkonflikt zu der für ausreichende Festigkeit notwendigen Materialdicke. Beim konventionellen Röntgen besteht die Lösung gegenwärtig darin, dass der durchstrahlbare Bereich der Auflagetische nur einen geringen Teil der wirksamen Gewichtskräfte aufnehmen muss. Den größeren Teil nehmen die im Seitenbereich liegenden Edelstahl- Versteifungen auf. Sie müssen wegen der ausreichenden Breite der Tische nicht mit durchstrahlt werden. So kann für den Bereich der Patientenauflagefläche eine optimale Röntgentransparenz gewährleistet werden. Bei Konstruktionen, die auch im CT verwendet werden müssen, kann ein versteifender Seitenbereich, z. B. aus metallischen Werkstoffen, während der Aufnahme nicht verwendet werden. Die Konstruktion muss daher entweder vor der Aufnahme zeitaufwändig zerlegt werden oder in sich selbsttragend sein. Das Abnehmen von versteifenden Seitenbereichen bei jeder Aufnahme ist im vorliegenden Anwendungsfall unakzeptabel und wird daher nicht weiterverfolgt. Die selbsttragende Struktur ermöglicht Durchstrahlung in beliebiger Richtung im CT und erlaubt beim konventionellen Röntgen ein Bild mit akzeptablen Artefakten.

Vermeiden von Artefakten

Artefakte (vgl. Kap. 2.4) erschweren die medizinische Diagnose. Kritische Bereiche müssen möglichst frei von ihnen sein. Hierfür ergeben sich grundsätzliche Lösungen:

➤ Vermeidung von scharfen Kanten

Generell müssen scharfe Kanten im Durchstrahlungsbereich vermieden werden. Sind Kanten vorhanden, dann müssen diese mit einem Rundungsradius versehen sein.

➤ Formschrägen

Da die tragende äußere Hülle eine geringe Wandstärke aufweist, kann sie zu einer scharfen Kante führen, wenn sie entlang der Schicht durchstrahlt wird. Es ergeben sich so Überhöhungen in der Absorption. Weist die äußere Struktur bezüglich der Röntgenstrahlung stets einen Winkel auf, so wird dieser Effekt verringert. Es sind daher ausreichende Formschrägen für das Liegenelement an allen Seiten vorzusehen.

➤ Querschnittsübergänge vermeiden

Querschnittsübergänge sind im Mittelbereich zu vermeiden. An anderen Stellen müssen sie mit großen Rundungsradien versehen werden.

➤ Homogenität

Ein homogener, gleichmäßig dicker Körper verursacht eine gleichmäßige (Kontrast-) Schwächung, aber keine Artefakte. Dichte- und Dickenunterschiede sind zu vermeiden. Dies gilt sowohl für den Kernwerkstoff als auch für die äußere Hülle.

Vergrößerung der Knicksicherheit

Sehr dünnwandige Hohlkörper neigen bei zu geringer Unterstützung des Kernwerkstoffes dazu, bei hoher Querkraftbelastung einzuknicken, obwohl die Spannungen, die sich über das Biegemoment und das Widerstandsmoment berechnen lassen, weit unterhalb der Grenzwerte liegen. Die Knicksicherheit muss daher konstruktiv optimiert sein.

Der Kernwerkstoff, der das innere Volumen ausfüllt, muss ein steifes, hart-elastisches Verhalten und eine hohe Druckfestigkeit besitzen.

Die Knickgefahr besteht nur auf der Druckseite. Ist dort eine größere Breite vorhanden, ergibt sich damit ein größerer Schutz vor Knickung.

Die Knickung kann im unkontrollierten Fall nach außen oder nach innen erfolgen. Dies ist besonders wichtig, da der Kernwerkstoff zwar druckstabil ist, aber die Stützung bei Knickung nach außen von der Qualität der Verbindung in der Grenzschicht abhängt. Löst sich diese Verbindung, z. B. durch längere

schwingende Belastung, kann der Kern keinen Schutz gegen Knickung nach außen bieten. Eine Verminderung dieser Gefahr wird durch die Wölbung der Druckseite nach innen erreicht. Damit ist die Verformungsrichtung vorgegeben. Die Wölbung erfolgt in Längs- und Querrichtung.

Eine Profilierung der Druckseite erhöht die Sicherheit gegen Knickung. Statt eines ebenen Querschnitts wird z.B. ein gewölbtes oder gewelltes Profil verwendet. Die Wölbung des Mittelbereiches ist bereits nach dem oben angegebenen Prinzip vorhanden. Eine zusätzliche Wellung wird durch das im Außenbereich verlaufende Befestigungsprofil erreicht.

Wird das Laminat der Druckseite nicht massiv, sondern auch als (dünne) Sandwichkonstruktion ausgeführt, so ergibt sich eine zusätzliche Steifigkeitserhöhung. Es ist dann ein Stützkern zwischen der Ober- und Unterseite sowie innerhalb der Druckseite vorhanden.

Eine weitere Möglichkeit des Knickschutzes besteht darin, nur den Seitenbereich mit einer höheren Wandstärke zu versehen. Dadurch ergibt sich auch eine größere Steifigkeit und Festigkeit für die Aufnahme der Anbauteile. Ein Einfluss auf das Röntgenbild im entscheidenden Mittelbereich besteht dabei nicht.

4.2 Prinziplösung und Gestaltung der Komponenten

Für die Erfüllung der Funktionen und Einhaltung der Anforderungen des Patientenauflegesystems sind unterschiedliche Wirkstrukturen denkbar. Es müssen daher prinzipielle Lösungen entwickelt und daraus eine optimal geeignete Auswahl getroffen werden.

4.2.1 Befestigungsmechanismen

Ein wesentlicher Vorteil des Auflegesystems gegenüber bekannten Produkten ist die Befestigungsmöglichkeit von Anbauteilen. Dieser Vorteil ist auch Gegenstand des vom DPMA erteilten Patentes. Es muss daher genauer auf die prinzipiell möglichen Varianten eingegangen werden.

Rein kraftschlüssige Lösungen können im vorliegenden Anwendungsfall nicht die unmittelbare Sicherheit der Anbauelemente gewährleisten. Es werden daher nur Varianten mit Formschluss betrachtet, bei denen das physikalische Prinzip der Kohärenz gilt.

Mögliche Varianten für kraftschlüssige Verbindungen nach Richtung der Befestigung sind:

1. Vertikales Einführen von oben an fester Position

Das Halterelementes kann z. B. in einen senkrechten, zylindrischen Durchbruch eingeführt werden. Das Element wird mindestens durch die Schwerkraft in der Position gehalten.

Vorteile:

- Der Freiheitsgrad der Rotation ist direkt realisierbar.
- Eine geringe Flächenpressung ist bei großem Durchmesser des Durchbruchs zu gewährleisten.

Nachteile:

- Die Positionsfindung wird durch das darüber liegende Laken bzw. den Patienten stark erschwert.
- Ein Anheben des Patientenkörpers ist während des Einführens u. U. notwendig.
- Durchbrüche sind fertigungstechnisch aufwändig.
- Feste Positionen erlauben keine Anpassung an Körpermaße.

2. Horizontales Einführen an fester Position

Das Einführen eines Halteelementes in eine sich horizontal und quer in die Liege vertiefende Öffnung.

Vorteile:

- Das Einführen ist leichter als bei einer vertikalen Variante durchführbar.

Nachteile:

- Es sind keine großen Führungslängen realisierbar, wenn der Mittelbereich artefaktfrei bleiben soll.
- Die Positionsfindung wird durch ein darüber liegendes Laken erschwert.
- Vertiefungen sind fertigungstechnisch aufwändig.
- Feste Positionen erlauben keine Anpassung an Körpermaße.

3. Horizontales Einführen an variabler Position

Ein im Seitenbereich der Liege verlaufendes Profil ermöglicht das Aufschieben eines starren Halters in Längsrichtung oder eines Halters mit Schließmechanismus in Querrichtung. Es sind folgende Varianten unter Berücksichtigung der Position der Profile an dem Liegenelement möglich:

- Das Profil ist nur unten vorhanden.

Das Profil ist nicht zugänglich und nicht sichtbar.

- Das Profil ist nur seitlich vorhanden.

Die geringe Höhe führt zu hohen Flächenpressungen bei Verkantung. Bei konkaven Formen entsteht eine Hinterschneidung.

- Das Profil ist nur oben vorhanden.

Das Profil ist gut sichtbar. Hinterschneidungen sind fertigungstechnisch aufwändig. Es ist nur ein konkaves Profil möglich, da sonst Druckstellen für den Patienten entstehen.

- Das Profil ist oben und unten vorhanden.

Es ist gut sichtbar. Es ergibt sich keine Hinterschneidung. Die Flächenpressung ist gering. Das Profil der Oberseite muss konkav sein.

- Das Profil ist oben, unten und seitlich vorhanden.

Der Profilkontakt an drei Positionen führt zu Doppelpassungen.

4.2.1.1 Befestigungsprofilvarianten

Die verbleibenden Profilvarianten (s.o.) werden weiter verfolgt und gestalterisch unter der Annahme verfeinert, dass eine Sandwichstruktur und keine massive Platte für das Liegenelement verwendet wird, **Abb. 4-13**.

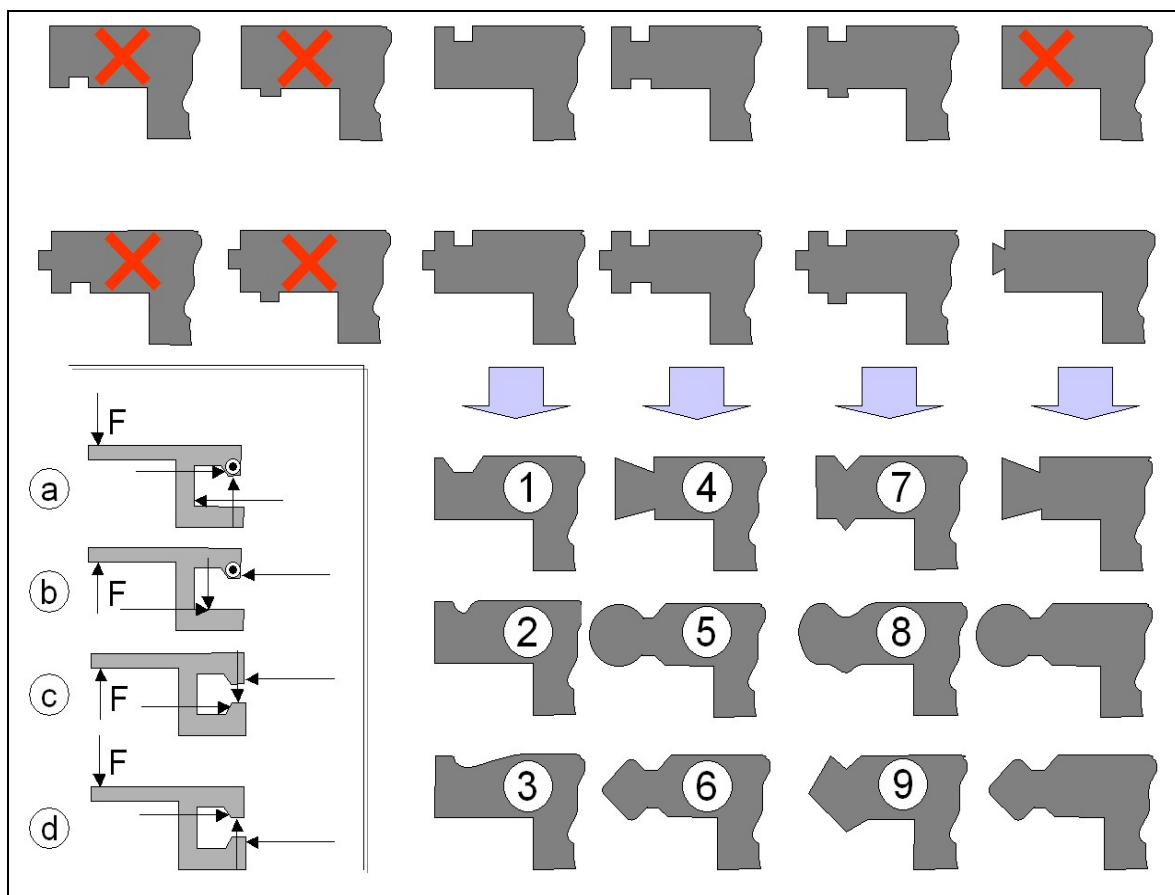


Abb. 4-13: Formvarianten für die seitliche Arretierung und wirksame Kräfte

Die Varianten 1, 2 und 3 besitzen nur auf der Oberseite ein Profil. Für Halter, die mit einer Kraft nach Krafrichtung a, wie in der Abbildung dargestellt, belastet werden, können diese Varianten verwendet werden, da sich der Halter seitlich in senkrechter Richtung zur Fläche abstützen kann. Die obere Vertiefung wirkt dabei als Drehpunkt. Wechselt die Krafrichtung (Krafrichtung b), muss sich der Halter unter geringem Winkel zur Unterseite abstützen, wodurch sehr hohe Flächenpressungen entstehen. Es sind daher die Varianten 4 bis 9 bei wechselnder Krafrichtung zu bevorzugen. Die Varianten 4 bis 6 führen zu einer Verringerung des Querschnitts, die auf dem Röntgenbild unter Umständen geringfügig sichtbar wird. Außerdem wird der maximal mögliche Querschnitt für

einen seitlichen festen Griff vermindert (vgl. **Abb. 4-17**). Der Vorteil der Varianten 4 bis 6 liegt in der größeren Bodenfreiheit des montierten Halters. Die Variante 5 ist mit einem zylindrischen Querschnitt als Formschluss nicht optimal geeignet, da der Freiheitsgrad der Rotation vorhanden ist. Die Varianten 7 bis 9 verhindern eine Montage von Anbauteilen in falscher Richtung und vermindern nicht den tragenden Querschnitt.

Die Varianten 8 und 6 werden für die Realisierung des CCB1 bis CCB3 (vgl. Kap. 4.2.3) verwendet, wobei in der Feingestaltung Formschrägen und ausreichende Rundungsradien berücksichtigt werden müssen.

4.2.1.2 Haltervarianten

Es sind grundsätzlich folgende Varianten für die Arretierung möglich:

1. Es wird ein starrer Halter ohne weitere Befestigung verwendet.

- Vorteile: Der Halter ist einfach und daher kostengünstig und schnell montierbar. Die Passungstoleranzen sind groß. Die Reinigung ist gut möglich.
- Nachteile: Es besteht keine Sicherung in Längsrichtung. Die Spielpassung führt bei Belastung zum Verkanten, wodurch eine hohe Flächenpressung entsteht. Der Verschleiß des Arretierungsprofils steigt mit Verringerung des Passungsspiels. Die Verkantung bei Belastung erhöht sich mit Zunahme des Passungsspiels. Es ist nur ein Aufschieben von der Seite möglich.

2. Es wird ein starrer Halter mit zusätzlichem Klemmmechanismus verwendet.

- Vorteile: Der Halter ist schnell fixierbar und sehr sicher, da stets Formschlüssigkeit besteht.
- Nachteile: Es ist nur Aufschieben von der Seite möglich. Die Konstruktion ist mechanisch aufwändig. Es sind sehr enge Fertigungstoleranzen der Liege notwendig. Ein Verschleiß des Liegenprofils ist beim Aufschieben möglich.

3. Es wird ein Halter mit Schließmechanismus verwendet.

- Vorteile: Der Halter ist von jeder Position aus montierbar. Es ist ein beliebiger Ausgleich von Fertigungstoleranzen der Liege möglich.
- Nachteile: Es ist eine Sicherung gegen unbeabsichtigtes Lösen notwendig. Die Konstruktion ist mechanisch sehr aufwändig und kostenintensiv. Das Gewicht ist hoch und die Reinigung schwer.

Es bestehen für alle Varianten folgende Einschränkungen:

- Der Schließmechanismus für den Halter der Armauflagen kann nur seitlich liegen.
- Eine geringe Bauhöhe auf Ober- und Unterseite ist für den Halter der Armauflagen notwendig.
- Eine geringe Bauhöhe ist auf der Unterseite stets erforderlich.
- Es ist ein möglichst geringes Gewicht zu erreichen.
- Bei Überbelastung tritt das Versagen des Halters vor dem Versagen der Liege mit vorheriger Erkennbarkeit (Fail- Safe- Verhalten) ein.

Der starre Halter besitzt das negative Gegenstück zum Profil der Liege, wobei ein bestimmtes Spiel zum Aufschieben notwendig ist. Je kleiner das Spiel, desto wahrscheinlicher ist ein Verkanten und ein Verschleiß des Arretierungsprofils während des Aufschiebens. Je größer das Spiel, desto besser kann das Element geschoben werden. Bei Belastung ist der Formschluss allerdings nur noch punktuell oder entlang einer Linienberührung gegeben, was zu hohen Flächenpressungen führt. Eine Punkt- oder Linienberührung muss daher konstruktiv verhindert werden. Dies ist durch entsprechende Gestaltung der Arretierungsprofile unter Berücksichtigung des Spiels, der daraus möglichen Verschiebung und der Verformung bei Kraftangriff aber nur bedingt möglich. Daher ist ein starrer Halter zur Befestigung und Krafteinleitung an einem Sandwichelement ungeeignet. Bei den massiven Arretierungsprofilen, die am Tischaufsatz (vgl. Kap. 4.2.6) verwendet werden, ist ein starrer Halter möglich.

Ein starrer Halter mit Klemmung ist aufgrund der geringen notwendigen Fertigungstoleranzen der Liege und des zwangsweise notwendigen, seitlichen Aufschiebens ebenfalls ungeeignet.

Günstig ist dagegen ein Halter mit Schließvorrichtung, da ein seitliches Aufschieben nicht notwendig ist und damit kein Verschleiß verursacht werden kann.

Für den Schließmechanismus können unterschiedliche physikalische Effekte verwendet werden [nach KOL98, S. 50]:

Erzeugung des für den Schließvorgang notwendigen Weges durch:

- eine elastische Verformung, z.B. Balkenfeder oder Filmscharnier,
- einen geometrisch- physikalischen Effekt (mit Krafterhöhung), z.B. Hebelkinematik, Schraube, Exzenter oder Kurvengetriebe.

Die Position wird gehalten durch:

- Haftreibung ($F_R = F \cdot \mu_H$), wobei die Normalkraft durch eine Federkraft, die Gravitation, einen Hebeleffekt ($F_1 = F_2 \cdot l_2 / l_1$) oder einen Keileffekt ($F_1 = F_2 \cdot \tan \beta$, Haftbedingung: $\beta < \arctan(\mu_H)$) hervorgerufen wird.
- Kohäsion (Formschluss durch das Profil und evtl. entlang des Profils)

Zu jedem dieser Einzeleffekte oder durch deren Kombinationen sind zahlreiche konstruktive Lösungen entwickelbar. Für die vorliegende Aufgabenstellung wird in **Abb. 4-14** eine Auswahl aufgezeigt.

Die Variante 3 mit Linearführung bietet den Vorteil der exakten parallelen Führung, ist aber mechanisch sehr aufwändig und schwer und wird daher nicht weiterverfolgt.

Besteht die Möglichkeit den Schließmechanismus nach oben zu verlagern, kann die Variante 6 verwendet werden. Hierbei wird die Klemmung wie bei einer Schraubzwinde erreicht.

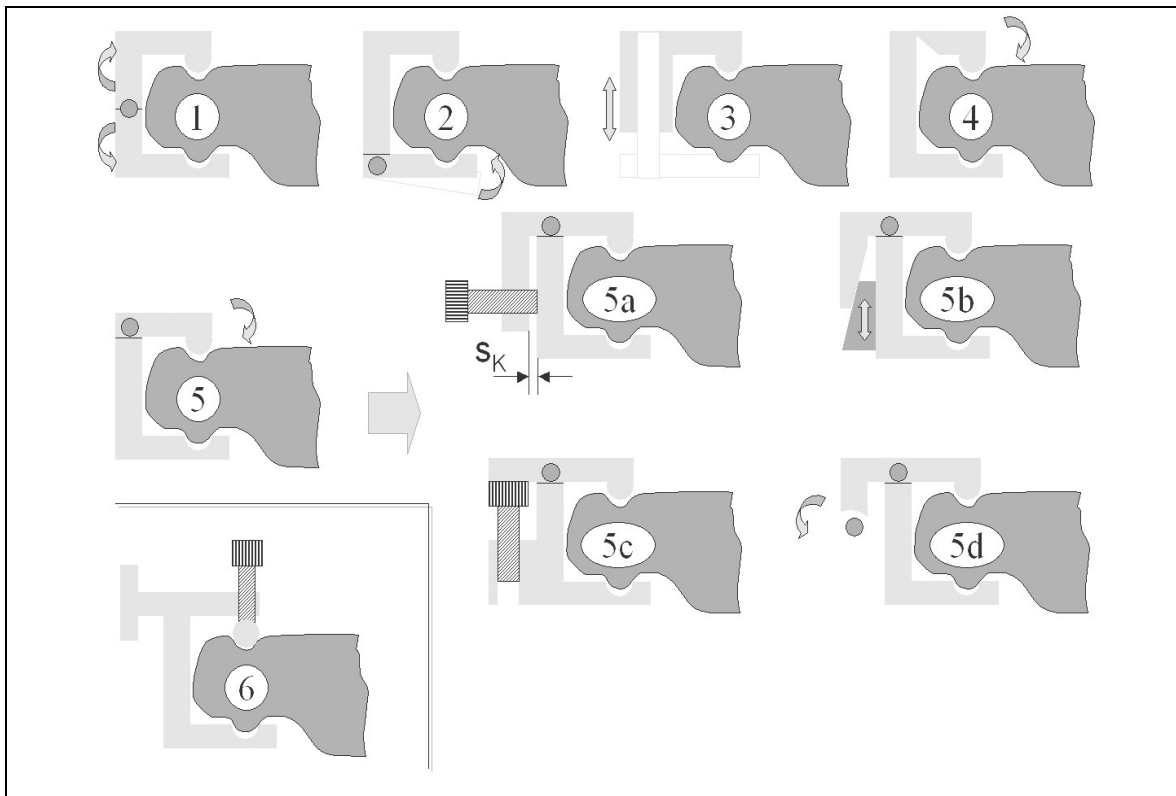


Abb. 4-14: Konstruktive Ausführungen des Schließmechanismus

Da die Höhe des Arretierungsprofils fertigungstechnisch variieren kann, ist bei Verwendung einer Hebelkinematik ein geringer Winkelversatz des Halters zur Senkrechten möglich, **Abb. 4-15**. Eine Prüfung dieser Abweichungen auf ihre Geringfügigkeit ist daher notwendig.

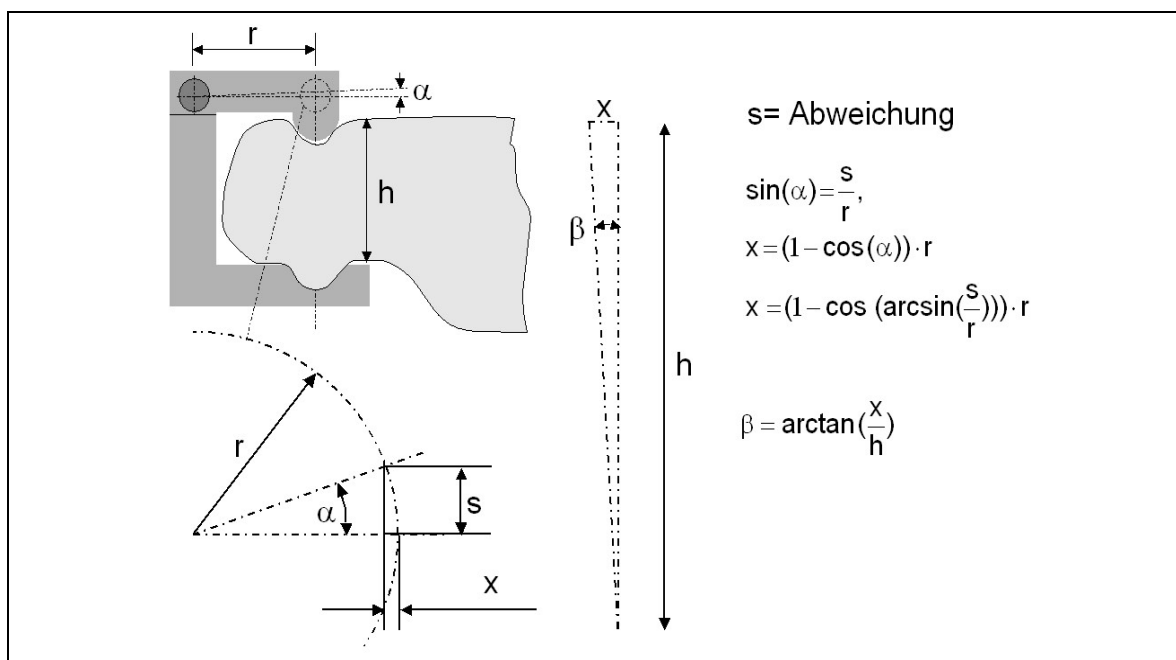


Abb. 4-15: Winkelversatz durch Hebelkinematik

Für eine sehr hohe Abweichung von $s=2$ mm, eine Hebelarmlänge von $r=30$ mm und einer Profilhöhe von $h=35$ mm ergibt sich eine Winkelabweichung des gesamten Halters von $\beta=0,10^\circ$. Das bedeutet z.B. für eine Armauflage mit einer Länge von 800 mm eine Durchsenkung am Endpunkt von nur 1,5 mm. Daher kann für die Erzeugung des Schließweges eine Hebelkinematik ohne weiteren Ausgleich eingesetzt werden. Ungünstig ist die Verwendung eines Drehgelenkes in der Mitte, da der Winkelversatz hier bei beiden Hälften auftritt.

Realisiert wurde für den Halter der Armauflagen des CCB2 nach Abb. 4-14 die Variante 5a, die mit Hilfe einer Schraube in horizontaler Richtung die notwendige Klemmung hervorruft. Der Spalt s_K wird konstruktiv so groß gewählt, dass ein vollständiges Öffnen möglich ist. Dadurch muss das Element nicht aufgeschoben werden. Für das CCB3 wird statt der Schraube eine Schnellspannvorrichtung nach Prinziplösung 5d der Abb. 4-14 verwendet.

4.2.1.3 Schutz der Befestigungsprofile des Liegenelementes

Die Befestigungsprofile des Liegenelementes sind insbesondere bei Verwendung von Armauflagen hohen Belastungen ausgesetzt. Diese entstehen durch das Hebelverhältnis von ca. 20:1 zwischen der freitragenden Länge der Armauflagen und dem Abstand der beiden tragenden Profilbereiche auf Ober- und Unterseite. Es müssen daher konstruktive Lösungen entwickelt werden, um diese Bereiche vor Überlastung zu schützen. Folgende Lösungen sind u. a. denkbar:

- Es ist eine Sollbruchstelle vorhanden.

Ein tragender Bereich gibt, bevor Überbelastung eintritt, langsam nach, verhält sich vorher aber steif. Es muss ein Fail- Save- Verhalten gewährleistet sein. Beispiel: Verwendung einer vorgespannten Feder oder einer Gasdruckfeder. Diese Lösung besitzt den Vorteil, dass bis zur Grenze der Überbelastung keine störende Verformung eintritt, ist aber mechanisch aufwändig und kostenintensiv.

- Die Armauflageplatte wirkt als Federelement.

Die Armauflageplatte weist eine definierte Steifigkeit auf, deshalb wird auch bei geringer Belastung stets eine Verformung auftreten, die aber für die Funktion

nicht störend ist. Die Steifigkeit der Armauflageplatte muss mindestens so hoch sein, dass die Durchsenkung nicht größer als die Höhe des Liegenelementes ist.

➤ Der Halter wirkt als Federelement

Der Halter verformt sich bei Überbelastung, kann aber nicht abfallen. Die Verformungsmöglichkeit führt bei Belastung zum Verkanten der Funktionsflächen und erhöht daher punktuell den Druck.

➤ Es ist ein druckverteilendes, austauschbares Zwischenelement vorhanden.

Der Halter oder das Liegenelement besitzen im Bereich der Funktionsflächen ein druckverteilendes Zwischenelement, welches im Falle von vorhandener Reibung als Erstes verschleißt. Eine Gummierung mit ca. 1 mm Stärke bietet z.B. eine sehr gute Druckverteilung mit progressiver Federcharakteristik und einen maximalen Schutz der Funktionsflächen, verhindert aber ein seitliches Schieben. Eine PTFE- Schicht ermöglicht seitliches Schieben, verteilt aber den Druck nicht so gleichmäßig wie ein Elastomer. Das Zwischenelement kann am Halter oder auch am Liegenelement montiert sein. Da die Reinigung und Montage dieses Elementes am Liegenelement aufwändiger ist und dieses stets mit durchstrahlt werden müsste, ist eine Montage am Halter vorzuziehen.

Die Beschreibung der realisierten Lösungen findet sich in Kap. 4.2.7 und die Auslegung in Kap. 5.2.6.

4.2.2 Griffe

Die Griffe sind ein wichtiger Funktionsbereich des Auflagesystems. Die Analyse möglicher Varianten ist deshalb notwendig. Die Mindestanzahl der Griffe liegt bereits fest. Sie beträgt nach [DIN99, S. 8] für ein langes Wirbelsäulenbrett vier an jeder Längsseite.

Für die prinzipiellen Lösungen eines Griffes erfolgt die Strukturierung nach der Befestigungsart und Flexibilität, **Abb. 4-16**. Zu jeder dieser Lösungen ist eine Vielzahl von gestalterischen Varianten möglich.

Die fertigungstechnisch einfachste Variante stellt das Liegenelement ohne Griffe dar. Dieses kann über die gesamte Länge einen konstanten Querschnitt aufweisen. Es muss allerdings stets mit einem Rettungstuch oder einem Laken verwendet werden. Diese Lösung wird nicht weiter verfolgt, da sie keine Richtungskontrolle der Last ermöglicht und ergonomisch keine Verbesserung bedeutet.

Befestigungsart	Harter Griff	Weicher, elastischer Griff
Griff untrennbar am Liegenelement befestigt	Unterfassbarer Durchbruch, Öffnung mit Hinterschneidung, herausstehende Griffstange an Kopf- und Fußende	Elastisches Verhalten erlaubt Unterfassen, z.B. Seil, Band, Elastomer
Griff mit Freiheitsgrad am Liegenelement befestigt	Rotation, Translation bzgl. Breite, Länge, Höhe, z.B. klappbar, drehbar, ausziehbar	Rotation, Translation bzgl. Breite, Länge, Höhe durch elastisches Verhalten und Aufhängung
Griff über eine lösbare Verbindung am Liegenelement befestigt	Formschluss oder Kraftschluss, z.B. Aufschieben, Klemmen, Einhaken, Einstecken, Schrauben	Aufschieben, Klemmen, Einhaken, Schrauben, Umwickeln, Durchziehen
Griff über ein Anbauelement indirekt am Liegenelement befestigt	Befestigung z.B. an Auflagematte oder Griffhalter	Befestigung z.B. an Auflagematte oder Griffhalter
Griff nicht am Liegenelement befestigt	Untergelegte Platte mit Griffen	Untergelegte Seil- oder Bandschlaufen oder Rettungstuch
Kein Griff vorhanden	Untergelegte(s) Platte oder Tuch	

Abb. 4-16: Prinzipielle Griffvarianten

Weiche, flexible Griffe in Form von Band- oder Seilschlaufen sind schwer zu reinigen, schneiden bei hohem Gewicht in die Hand ein und gestatten keine optimale Richtungskontrolle. Es ist nur ein Ziehen, nicht aber ein Drücken möglich. Der Vorteil der Verwendung von Bandschlaufen ist der sehr niedrige Preis, der bezüglich der Hände niedrige Schwerpunkt und die Möglichkeit der Überbrückung von größeren Abständen zwischen Personal und Liegenelement z.B. beim Umbetten. Der Nachteil des Einschneidens kann durch Umhüllung mit einem

Hohlprofil im Greifbereich vermieden werden. Die Umschlingung des Handgelenkes bzw. -rückens mit der Schlaufe vermeidet das direkte Halten der Finger und ermöglicht eine gleichmäßigere Einleitung der Haltekraft in die Hand. Diese Lösung wird nur als zusätzliche Möglichkeit vorgesehen.

Die Verwendung des Seitenprofils der Liege ermöglicht die Befestigung von Griffen über separate Halter an beliebiger Position. Ein seitliches Verrutschen darf dabei aber nicht auftreten, da sonst das Tragen über Treppen nicht mehr gewährleistet ist. Außerdem stehen die Halterungen seitlich über, wodurch der Platz im CT vermindert wird. Diese Lösung wird daher nicht weiterverfolgt.

Die erste realisierte Variante (CCB1) ist der unterfassbare Durchbruch in Form einer Griffstange, die untrennbar mit dem Liegenelement verbunden ist (vgl. Abb. 4-17). Diese Lösung wird standardmäßig auch bei langen Wirbelsäulenbrettern verwendet.

Die zweite realisierte Lösung (CCB2 und CCB3) ist der drehbare, steife Griff. Er ermöglicht die nötige Fingerfreiheit auch in ungünstigen Winkellagen. Dies gewährleistet der feste Griff des CCB1 mit einer Höhe der Oberseite von 50 mm nicht. In den Griff können insbesondere Zugkräfte aber auch geringe Druckkräfte eingeleitet werden. Im Hinblick darauf, dass nicht nur das Aufbringen von Kräften in senkrechter Richtung, sondern auch die Kräfte in Längsrichtung des Liegenelementes von Bedeutung sind (Treppensteigen), eignet sich ein drehbarer Griff gut für die Richtungskontrolle in Längsrichtung.

Für das CCB2 werden Griffe mit rundem Querschnitt verwendet (vgl. Kap. 6.1.2). Diese liegen gut in der Hand, sind aber bei Nässe nicht optimal rutschfest. Das CCB3 besitzt daher Griffe mit einem eckigen Querschnitt, die einfacher zu fertigen und rutschfester sind (vgl. Kap. 6.1.3).

4.2.3 Liegenelemente CCB1 bis CCB3

Für die vorliegende Problemstellung wurden zwei grundsätzliche Varianten entwickelt, die als Prototypen klinisch getestet wurden. Die erste Lösung CCB1 (Critical Care Board 1) beinhaltet ein Liegenelement mit verstellbaren Kopf- und Fußteilen, die zweite Lösung CCB2 ein festes Liegenelement ohne Verstellmöglichkeiten. Das CCB3 entspricht einem in verschiedenen Bereichen optimierten CCB2. Die Beschreibung der praktischen Prüfung dieser Weiterentwicklung erfolgt in dieser Arbeit aus zeitlichen Gründen nicht mehr. Das vollständige CCB3 zeigt Abb. A 6.

Für die Grundform nach Abb. 4-8 Variante 1 ergibt sich das Problem, dass die Außenbereiche nicht genug Höhe aufweisen, um unterfasst werden zu können. Außerdem sind Formschrägen oder Rundungen noch nicht berücksichtigt. Ein weiteres Problem besteht darin, dass Dickenunterschiede vorhanden sind, die zu einer unterschiedlichen Schwächung der Röntgenstrahlung führen. Die für das CCB1 realisierte Lösung zeigt Abb. 4-17.

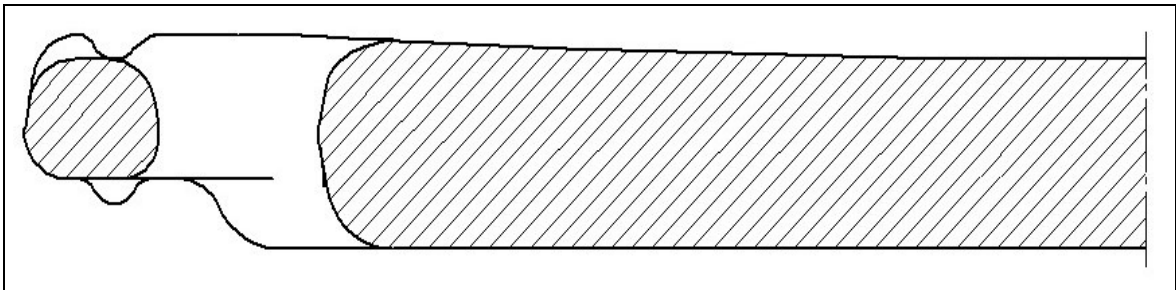


Abb. 4-17: Querschnitt des Liegenelementes des CCB1 im Bereich der mittleren Griffe

Der Befestigungsbereich befindet sich so weit wie möglich außen. Rundungsradien und Formschrägen sind vorhanden. Die Liegefläche ist leicht gewölbt. Der Profilbereich ist auf der Oberseite konkav und auf der Unterseite konvex ausgeführt (vgl. Kap. 4.2.1.1). Im Bereich der Griffe können Anbauteile seitlich aufgeschoben werden, sofern diese einen Formschluss aufweisen. Der zur Verfügung stehende Platz unter den Griffen ist soweit maximiert, wie es die Festigkeit und Steifigkeit des Werkstoffs für die gegebene Wandstärke im Bereich der Griffe zulassen. Dies stellt einen suboptimalen Zustand dar, der aber aufgrund der gegebenen maximalen Gesamthöhe mit einem festen Griff nicht weiter

verbessert werden kann. Für den praktischen Einsatz wurden daher zusätzlich Griffschlaufen verwendet, deren Befestigung an den Griffstangen erfolgte.

Das komplette, realisierte Liegenelement des CCB1 in der Grundstellung zeigt **Abb. 4-18**.

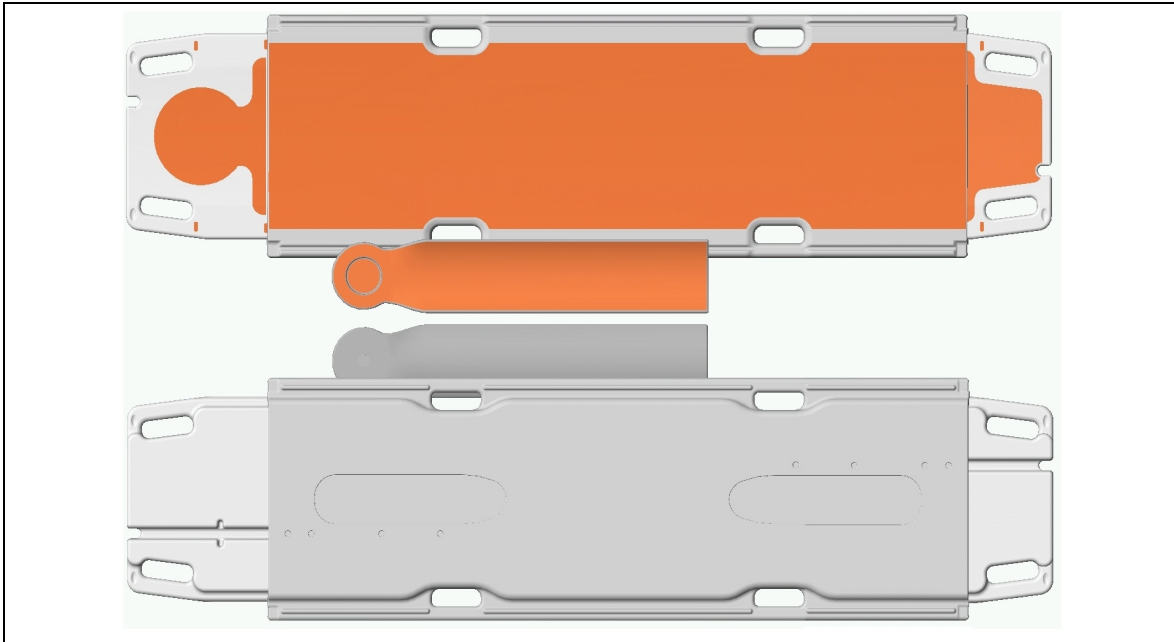


Abb. 4-18: Realisierte Lösung des Liegenelementes des CCB1 mit Kopf- und Fußteilen

Das Liegenelement beinhaltet verstellbare Kopf- und Fußteile, um eine Anpassung an die Körpermaße des Patienten zu ermöglichen. Durch das komplette Einschieben der Elemente ist eine platzsparende Aufbewahrung möglich. Das Kopf- und das Fußteil sind in den Abstufungen 50, 150, 300 und 350 mm ausziehbar. Die Grundposition ist für das Kopfteil 300 mm und für das Fußteil 150 mm bei einer Gesamtlänge von 1950 mm und einer Breite von 500 mm. Das Mittelteil weist eine Länge von 1500 mm auf. Es können dadurch die Gesamtlängen 1600 mm, 1950 mm, 2100 mm und 2200 mm realisiert werden. Die Arretierung der Kopf- und Fußteile in den verschiedenen Positionen wird durch jeweils einen integrierten Stellhebel erreicht, der in der Mitte drehbar gelagert ist und am Ende in auf der Unterseite des Mittelteils eingebrachten Bohrungen eingreift. Das Mittelteil besitzt auf der Unterseite Öffnungen, um die Taschen für das Kopf- bzw. Fußteil von Hand reinigen zu können.

Das Kopf- und das Fußteil besitzen einen Einschubbereich, in den die für Schädel-CTs standardmäßig verwendeten Kopfschalen eingeführt werden können, **Abb. 4-19**.

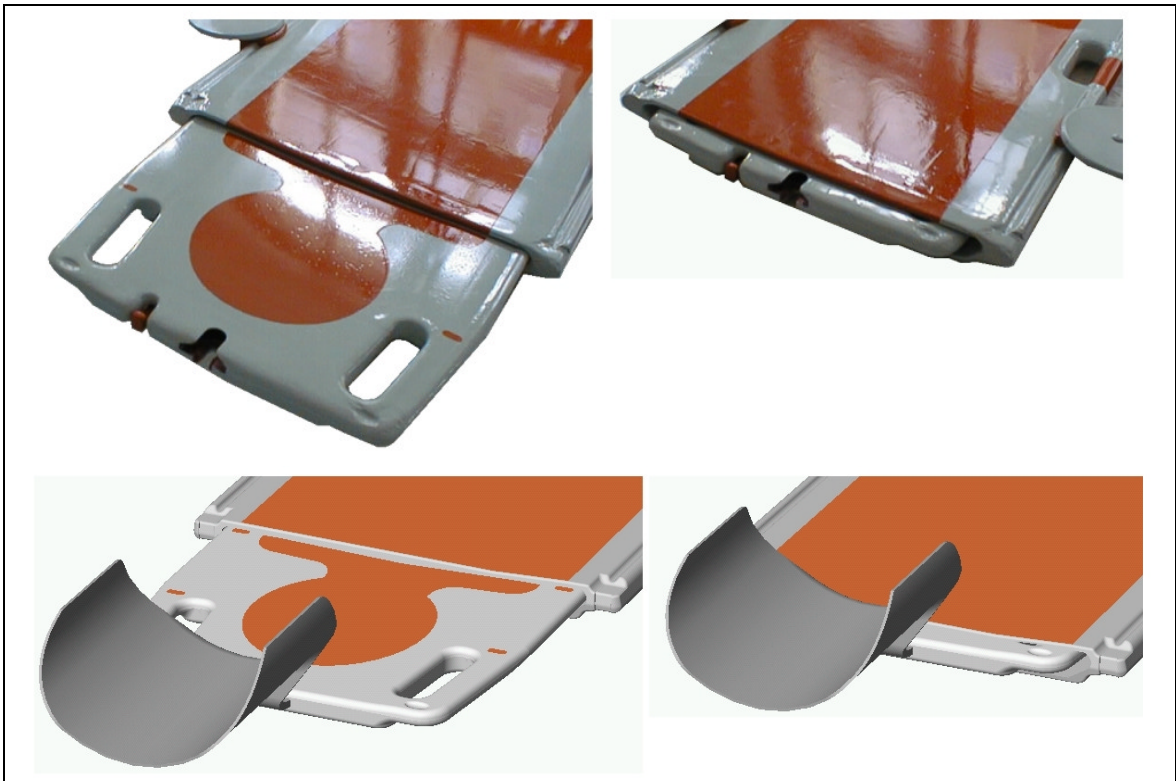


Abb. 4-19: Kopfteil des CCB1 im ausgefahrenen und eingefahrenen Zustand,
unten: mit CT-Kopfschale

Dieser Einschubbereich ist in das Sandwichelement integriert und mit diesem untrennbar verbunden. Befindet sich der Patient im CT auf der Liege, wird in den Einschub die CT- Kopfschale eingesetzt und dann das Kopfteil eingeschoben. Dadurch kann die CT-Kopfschale unter den Patientenkopf bewegt werden, ohne dass der Patientenkörper bezüglich der Liegefläche bewegt werden muss. Es ist lediglich ein leichtes Anheben des Kopfes notwendig.

Nachdem die Aufnahme erfolgt ist, wird das Kopfteil wieder herausgezogen und die CT- Kopfschale entfernt. Der Patient kann nun auf dem CCB weitertransportiert werden.

Das CCB2 beinhaltet ein festes Liegenelement mit drehbaren Griffen, **Abb. 4-20**.

Insbesondere die Bodenfreiheit unter den Griffen ist durch dessen Drehbarkeit deutlich erhöht und die Artefakte sind durch die Vermeidung von Kanten im Mittelbereich wesentlich geringer.

Die Lagerung der Griffe erfolgt in Gleitlagern, die in das Liegenelement fest eingegossen sind (vgl. Kap. 4.2.4). Durch die einteilige Form ist ein hohes

Kosteneinsparpotenzial im Bereich der Fertigung im Vergleich zum Liegenelement des CCB1 gegeben.

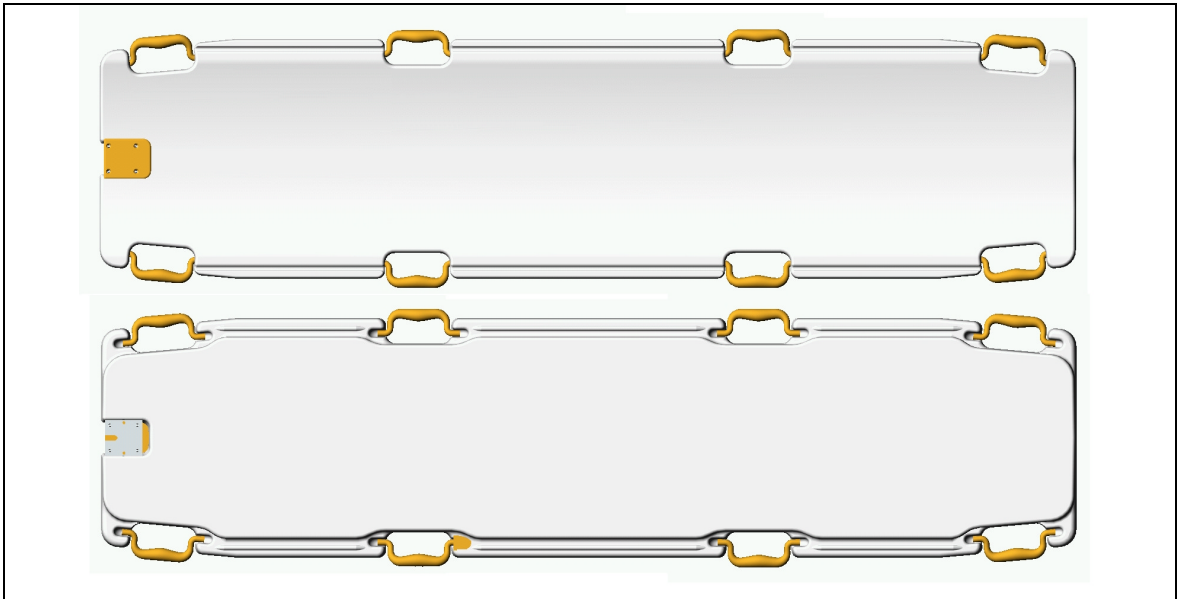


Abb. 4-20: Liegenelement CCB2

Das Liegenelement des CCB3 in **Abb. 4-21** besitzt die gleiche Grundform wie das Liegenelement des CCB2 und stellt daher dessen Weiterentwicklung dar.

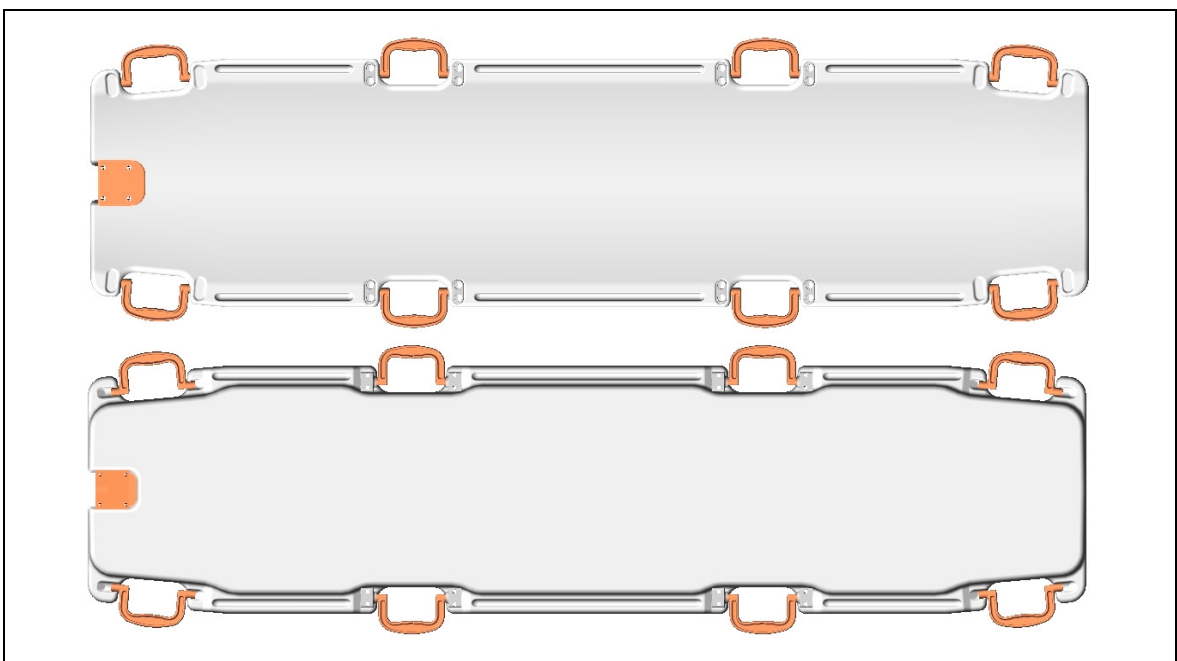


Abb. 4-21: Liegenelement CCB3

Das Befestigungsprofil ist auf Ober- und Unterseite konkav ausgeführt und erlaubt kein seitliches Einschieben mehr. Die Drehgriffe sind nochmals verlängert

und als Vollprofil ausgeführt. Die Lagerung der Griffe erfolgt in mit dem Liegenelement verschraubten Haltebuchsen.

4.2.4 Grifflagerungen bei CCB2 und CCB3

Die Verbindung der Drehgriffe mit dem Liegenelement besitzt folgende Anforderungen:

- Es ist eine sichere und großflächige Krafteinleitung gewährleistet.
- Der Freiheitsgrad der Rotation ist gegeben.
- Eine Dämpfung der Rotation ist vorhanden.
- Die Verbindung ist reinigungsfreundlich und ggf. lösbar.

Die Griffe sind in Gleitlagerbuchsen drehbar gelagert, die in rein äußere Vertiefungen des Liegenelementes eingepasst sind. Damit wird eine großflächige Krafteinleitung vom Griff in das Liegenelement möglich. Durch axiale Vorspannung mit Hilfe eines Elastomerkörpers wird eine so große Reibkraft zwischen Lager und Drehgriff erzeugt, dass das Gewicht des Griffes in der jeweils gewählten Position sicher gehalten wird. Eine elastische Rückstellung in eine bestimmte Position wurde nicht vorgesehen, da im CT die Position *senkrecht* und bei Auflagerung des Patienten und konventionellem Röntgen die Position *waagerecht* am günstigsten ist. Die Grifffläche ist leicht gewölbt, um die Haltekraft gleichmäßig in die Hand einleiten zu können. Die Prinzipskizze zeigt **Abb. 4-22**.

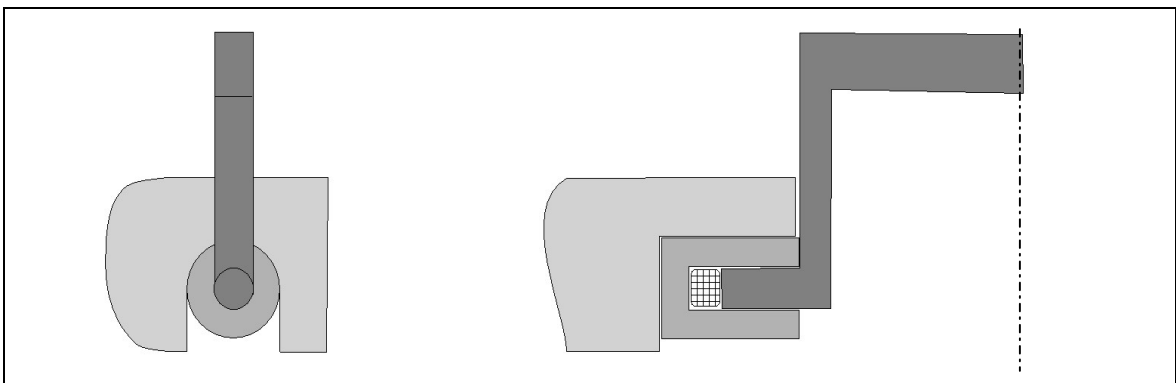


Abb. 4-22: Prinzip der Verbindung zwischen Drehgriff und Liegenelement

4.2.5 Kopfhalter und Arretierung bei CCB2 und CCB3

Die Kopfhalterarretierung ist am Liegenelement (trennbar) montiert und besteht aus zwei Elementen, dem Einschubelement und dem Deckel, **Abb. 4-23**.

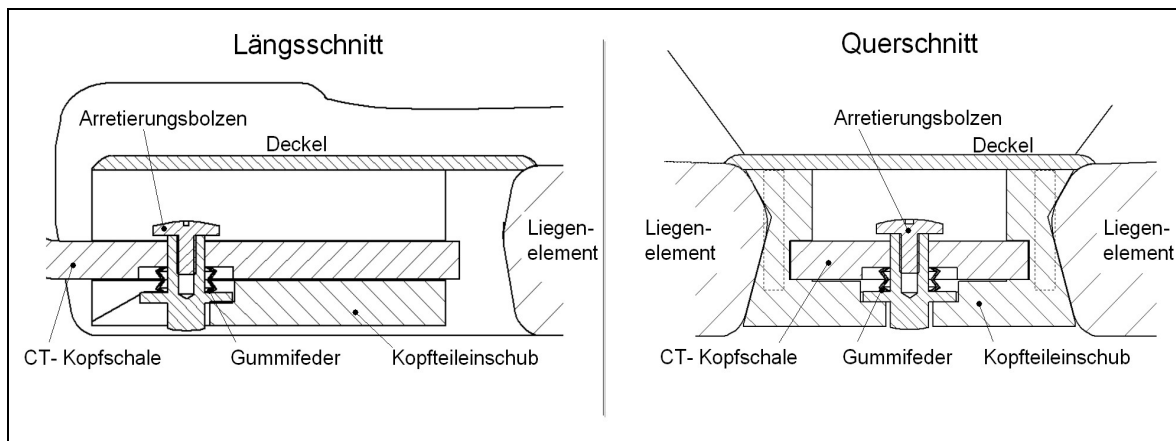


Abb. 4-23: Kopfhaltereinschub CCB2 und CCB3

Sie dient somit als austauschbares Adapterelement. Der besondere Vorteil der gewählten Ausführung liegt darin, dass die Arretierung nicht wie beim CCB1 in das Innere des Liegenelementes in einem weiteren Arbeitsgang eingepasst werden muss, sondern formschlüssig mit diesem nur rein äußerlich verbunden wird. Das Liegenelement weist dafür eine entsprechende Aussparung auf. Dadurch ist eine sehr großflächige Kraftübertragung möglich. Das eingesteckte Kopfteil verhindert, dass sich die Seitenbereiche des Einschubes bei Belastung der Kopfschale nach innen verformen können (vgl. **Abb. 5-11**). Damit wird eine zusätzliche Steifigkeit und Sicherheit erreicht.

Nachteilig wirkt sich aus, dass der Patient im CT bezüglich des Liegenelementes bewegt werden muss, um seinen Kopf in der augenblicklich verwendeten CT- Kopfschale (vgl. Abb. 4-19), die über das Kopfende herausragt, lagern zu können.

Eine Verbesserung wird durch die Verwendung von Elementen erreicht, die eine Auflagerung des Kopfes ohne Bewegung des Patienten ermöglichen, **Abb. 4-24**. Eine von der Standard- Kopfschale abgeleitete Lösung stellt der Kopfhalter dar, der in Abb. 4-24 links oben dargestellt ist. Bei der Montage muss nur der Kopf des Patienten etwas angehoben werden. Diese kostenaufwändige CFK-Konstruktion

wurde aber nicht ausgeführt. Eine weitere Vereinfachung führt daher zur Auflagerung des Kopfes direkt auf der Liegefläche.

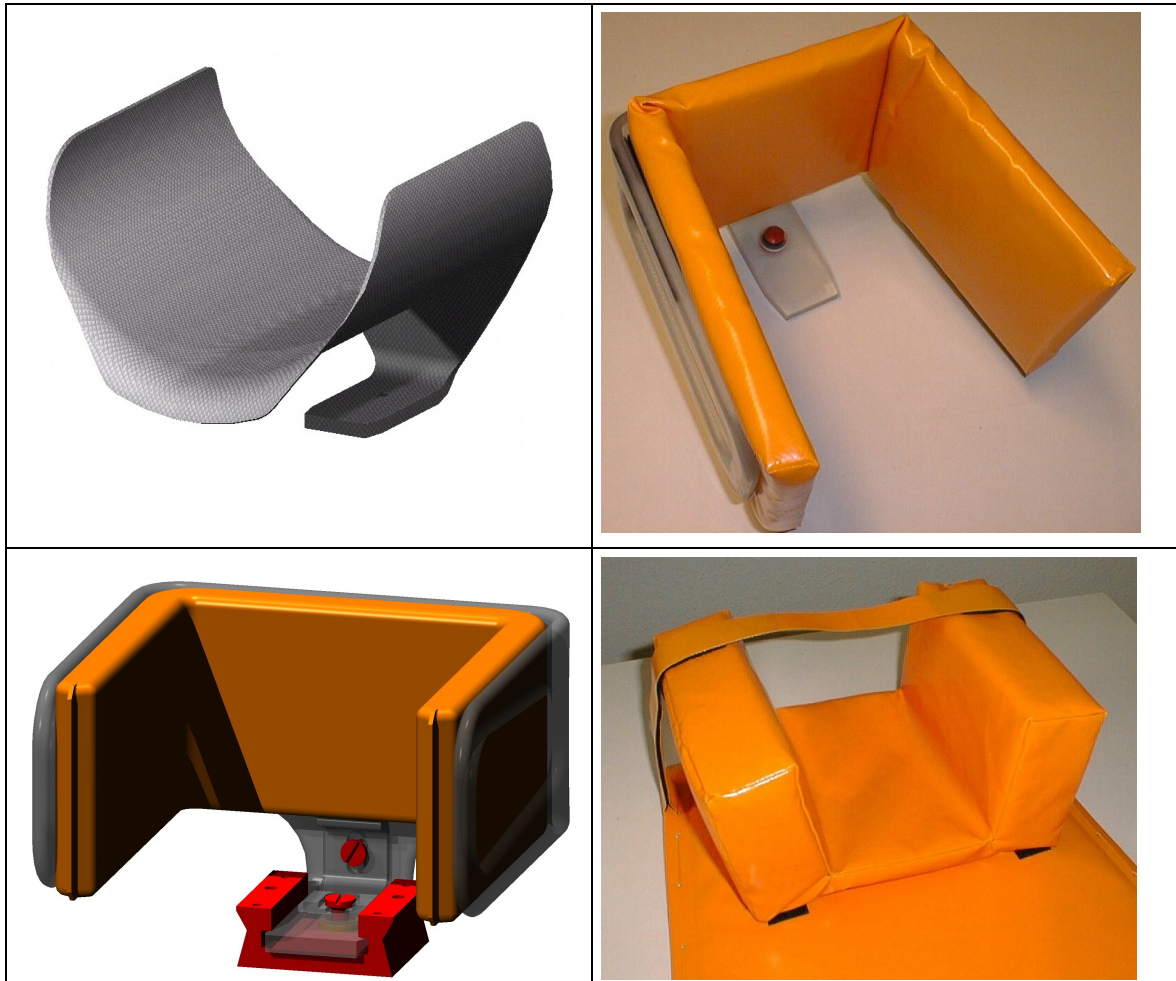


Abb. 4-24: Mögliche und realisierte Kopflagerungslösungen für Schädel- CTs bei Verwendung des CCB2 und CCB3

Die klinisch getesteten Lösungen sind der durchstrahlbare Kopfhalter, der auch in der Kopfhalterarretierung fixiert wird, und das durchstrahlbare weiche Kopfteil. Diese können bereits als Vorserienbauteile bezeichnet werden, da sie mit dem Serienfertigungsverfahren und -werkstoff hergestellt wurden [BERG02]. Eine aufwändige und kostenintensive CFK- Konstruktion kann dabei vermieden werden, da die auftretenden Belastungen wesentlich geringer sind. Abb. 4-24 zeigt unten links den Kopfhalter des CCB3, der gegenüber der rechts oben dargestellten Variante des CCB2 um einen von oben zugänglichen Entriegelungsmechanismus erweitert wurde.

4.2.6 Tischaufsatz

Der Tischaufsatz dient dazu, die notwendigen (elektrischen) Geräte aufzunehmen. Diese bestehen aus metallischen Werkstoffen. Es kann daher auch für den Tisch eine Metallkonstruktion verwendet werden. Eine Durchstrahlung des Tischaufsatzes ist nicht vorgesehen. Als Werkstoff wird Aluminium verwendet, da es nichtmagnetisch und gut zu reinigen ist sowie eine geringe Dichte aufweist. Der Tischaufsatz ist damit auch im Bereich MRT einsetzbar.

In klinischen Bereichen wird standardmäßig eine Profilschiene eingesetzt, die einen Rechteckquerschnitt mit einer Höhe von 25 mm und einer Breite von 10 mm aufweist. Sie befindet sich seitlich am Schockraumtisch, an jedem Patiententransporter und häufig als Wandmontage auf den Krankenstationen. An dieser Schiene können diverse Halter fixiert werden. Die Verwendung dieser Schiene am Tischaufsatz gestattet die Nutzung bestehender Technik und damit eine gute Integration.

Die Befestigung des Tisches ist auf zwei zentrale Kniehebelverschlüsse reduziert, die über Rastbolzen gegen unbeabsichtigtes Öffnen gesichert werden. Den klinisch getesteten Tischaufsatz zeigt **Abb. 4-25**.

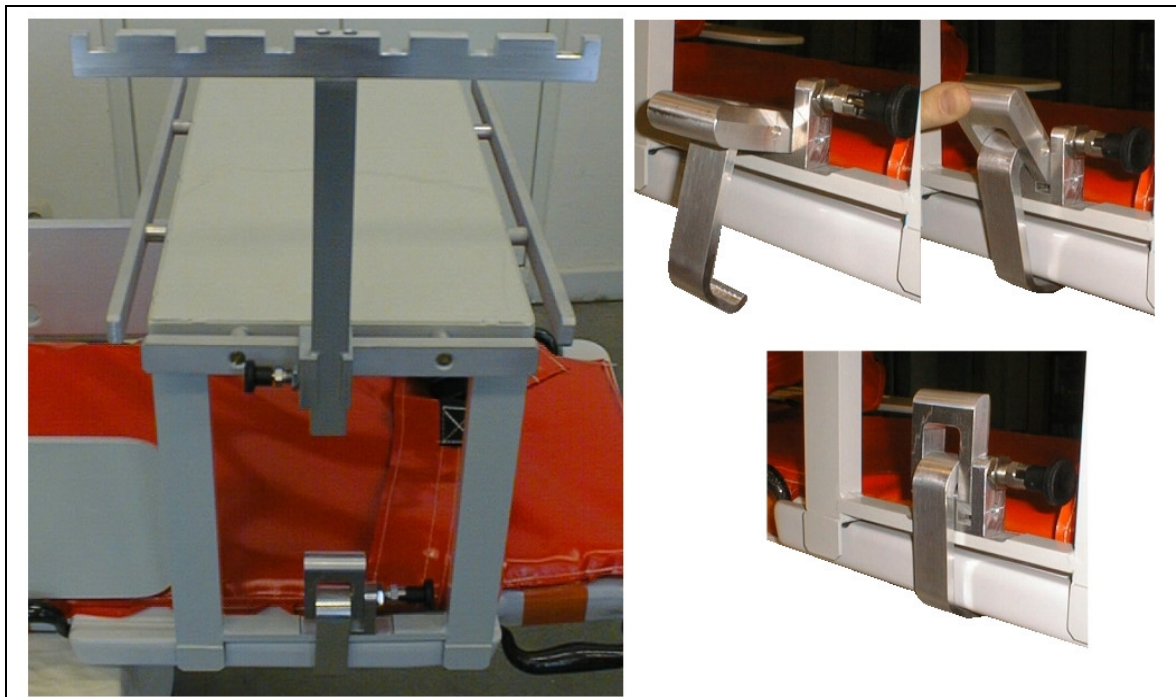


Abb. 4-25: Realisierter Tischaufsatz des CCB2 und dessen Arretierung

Die Querstrebe des Tisches, die den Arretierungsmechanismus trägt, und der Verschlusshaken bilden zusammen ein in Reihe geschaltetes Federelement, wodurch geringe Fertigungstoleranzen des Liegenelementes ausgeglichen werden. Die Vorspannung des Verschlusses ist so gewählt, dass stets ein Anpressdruck vorhanden ist, der das Gewicht des Tisches mit Equipment übersteigt (vgl. Kap. 5.2.2). Die Steifigkeit ist so groß, dass im normalen Betrieb kein Abheben des Tisches möglich ist. Der Verschluss selber besitzt keine Einstellmöglichkeit. Das Herausziehen des Arretierungsbolzens im gespannten Zustand führt nicht zum unkontrollierten spontanen Aufspringen, sondern es erfolgt eine geringfügige Bewegung des Verschlusshebels zur Innenseite. Dadurch besteht keine Verletzungsgefahr. Durch die hohe Federsteifigkeit des Arretierungsmechanismus wird erst dann eine hohe Schließkraft notwendig, wenn der Hebel kurz vor dem Arretierungspunkt steht. Beim Öffnen steht demnach kaum ein Kraftanteil zu Verfügung, der den Hebel unkontrolliert herumschlagen lässt. Eine Verringerung der Verletzungsgefahr ist dadurch ebenso gegeben.

Durch die gummierten Auflagefüße kann der arretierte Tischaufsatz in Längsrichtung nicht verschoben werden und das Liegenelement wird vor Beschädigung geschützt.

4.2.7 Armauflage

Die Armauflage dient dazu, die Arme insbesondere im Schockraum vom Körper abzustrecken. Die ergonomisch notwendigen Abmessungen sind in Kap. 2.7.2 vorgestellt worden und ergaben, dass eine Spannweite von 2000 mm für alle Patienten ausreicht. Da sich im klinischen Test des CCB1 und CCB2 gezeigt hat, dass diese Spannweite nicht benötigt wird, wird diese beim CCB3 auf 1800 mm bei einer Breite von 120 mm reduziert.

Für das CCB1 wurde eine Armauflage mit geringfügig elastischem Kunststoffhalter verwendet. Die Auflageplatte ist nur drehbar, nicht klappbar. Das zum Aufschieben notwendige Profilspiel bewirkt beim Belasten eine starke Verkantung des Halters und damit eine hohe Flächenpressung der Profilbereiche. Weiterhin ergibt sich eine sichtbare Schiefstellung der Auflageplatte, die aber die Funktion nicht beeinträchtigt, **Abb. 4-26**.



Abb. 4-26: Armauflage am CCB1

Der Armhalter des CCB2, der in **Abb. 4-27** dargestellt ist, besteht aus einem Halter in Aluminiumbauweise mit Schließmechanismus über eine Schraubverbindung und einer Auflageplatte aus einer CFK- Sandwichstruktur. Er ist schwenk- und klappbar und kann damit auch für die meisten Patienten als seitliche Stütze beim Transport verwendet werden. Die Laminatverstärkung der Auflageplatte ist so ausgelegt, dass sie bei fester Einspannung eine am Endpunkt aufgebrachte Last von 1000 N sicher tragen kann. Eine sichtbare Durchsenkung ist bei normaler Belastung weder in abgestreckter noch in seitlich angelegter Position feststellbar.

Die hohe Steifigkeit dieser Variante der Armauflage führt zu extrem hohen Belastungen des Halters bzw. des Liegenelementes (Hebelverhältnis ca. 20:1). Diese werden in die Sandwichstruktur des Liegenelementes aber nur dann großflächig eingeleitet, wenn der Halter stets fest geschlossen wird (Presssitz). Die klinische Erprobung hat gezeigt, dass dies nicht erfolgt. Es kommt zum Verschleiß der Profilbereiche. Zum Schutz des Profilbereiches vor Bruch weist der Halter eine Sollbruchstelle auf.



Abb. 4-27: Armauflage und Halter am CCB2

Für die Armauflage des CCB3 wird die Konstruktion so ausgelegt, dass eine ausreichende Steifigkeit und Sicherheit gewährleistet ist, aber die Profilbereiche des Liegenelementes vor Überbelastung und Verschleiß geschützt werden. Es wird eine Armauflage verwendet, die einen Halter mit Schnellspannvorrichtung besitzt. Die Bereiche des Halters, die in das Profil des Liegenelementes eingreifen, sind aus Kunststoff ausgeführt. Der Kunststoff besitzt gute Gleiteigenschaften und eine wesentlich geringere Härte als das Liegenelement. Die Schnellspannvorrichtung erlaubt nur eine Endstellung und gewährleistet damit zwangsweise einen korrekten Presssitz des Halters. Die definiert weiche Armauflageplatte wird auf eine maximale Tragfähigkeit von 200 N am Endpunkt ausgelegt. Die Durchsenkung bei einer Streckenlast von 0,14 N/mm (100 N / 700 mm Gesamtlänge) beträgt am Endpunkt weniger als 40 mm (vgl. Kap. 5.2.6 und 7.2.2).

4.2.8 Polsterauflage

Die harte Oberfläche des CCB- Liegenelementes bietet keinen ausreichenden Komfort über die gesamte Prozesskette. Es muss daher eine Polsterauflage vorhanden sein, die für einen begrenzten Zeitraum genügend Komfort bietet, eine geringe Höhe aufweist, ohne Artefakte durchstrahlbar, desinfektionsmittelbeständig, langlebig, haltbar und wasserdicht ist. Genähte Polsterauflagen sind nicht geeignet, da Nähte nicht absolut wasserdicht ausgeführt werden können. Es wurde eine Polsterauflage entwickelt, die gleichzeitig auch integrale Befestigungsmöglichkeiten z.B. für Gurte bietet, **Abb. 4-28**.

Gurte sind notwendig zur Befestigung der Polsterauflage an dem Liegenelement und zur Sicherung des Patienten auf der Liegefläche. Für die Befestigung mit dem Liegenelement verläuft der Gurt im Bereiche der Griffe um das Liegenelement herum. Die Gurte dienen damit gleichzeitig dem Schutz des Liegenelementes, da bei ebener Aufstandsfläche ein Abgleiten nur auf den Gurten erfolgt. Die Gurte zur Sicherung des Patienten sind mindestens an drei Positionen vorhanden und werden mit Schnellverschlüssen aus Kunststoff geschlossen. Durch die hohe Anzahl an möglichen Befestigungspositionen entlang der Auflage kann die Anzahl und Position der verwendeten Gurte den jeweiligen Bedürfnissen bzw. dem Patientengewicht angepasst werden.



Abb. 4-28: Befestigungsbereich von Gurten an der Polsterauflage

Die Außenhülle der Polsterauflage besteht aus verschweißbarem, gewebeverstärktem und beschichtetem Kunststoff mit einer Flächenmasse von ca. 650 g/m². Dieser Werkstoff ist langlebig und wesentlich belastbarer, als eine integralgeschäumte Polsterauflage mit dünner Außenhaut.

Der verwendete Schaumstoff der Polsterauflage muss geschlossenzellig sein, um ein Eindringen von Flüssigkeiten auch bei Beschädigung der Außenhülle zu verhindern. Geeignet ist z.B. ein PUR- Weichschaum mit einem Raumgewicht von ca. 40 kg / m³ (\triangleq 400N/m³) und einer Stauchhärte von ca. 5 kPa (bei 40% Höhenreduktion nach DIN 53577 / ISO 3386-1).

5 Auslegung der Komponenten

Die Vorauslegung dient dazu, eine Aussage treffen zu können, welche Belastungen in den Bauteilen auftreten und welche Menge Werkstoff eingesetzt werden muss, um diese Belastungen ertragen zu können. Spätere numerische Berechnungen am virtuellen Modell dienen dazu, kritische Bereiche aufzuzeigen. Dies führt zu einer optimierten Gestalt bzw. sichert die Vorauslegungen ab. Maßgeblich für die endgültige Auslegung sind die Ergebnisse der praktischen Belastungsversuche.

5.1 Vorauslegung der Liegenelemente

Über analytische Rechenverfahren erfolgt die Vorauslegung der entwickelten Liegenelemente des CCB1 und CCB2. Die Berechnung der Biegemomente und -kräfte ergibt sich aus den Kräfte- bzw. Momenten- Gleichgewichten. Die Berechnung der Laminatstärken erfolgt mit Hilfe der Netztheorie.

5.1.1 Belastungen und notwendige Schichtstärken CCB 1

Das CCB1 besteht aus drei Elementen, in denen durch die Gewichtskraft des Patienten Biegespannungen hervorgerufen werden. Nach [DIN99] gilt für Krankentragen, dass diese

- ein Gewicht von 1500 N, aufgebracht in der Mitte durch einen Sandsack mit einem Durchmesser von 300 mm
- oder ein Gewicht von 2500 N, aufgebracht über sechs über die Fläche verteilte Sandsäcke

ohne bleibende Verformung ertragen müssen. Für die Auslegung muss weiterhin ein Sicherheitsfaktor von $S=4$ berücksichtigt werden.

Es wird eine in der Mitte angreifenden Punktlast von 6000 N als höchste Belastung angenommen, da eine Punktlast von ca. 1500 N ein höheres Biegemoment bewirkt als eine gleichmäßig verteilte Gewichtskraft von 2500 N. Diese Belastung führt in den Kopfteilen zu Lagerkräften nach **Abb. 5-1**. Dargestellt sind nur die von außen aufgeprägten Belastungen und die auf die Kopfteile dadurch resultierenden inneren Reaktionskräfte. Die Reaktionskräfte, die auf das Mittelteil wirken, ergeben sich aufgrund des Kräftegleichgewichts in umgekehrter Richtung der eingezeichneten Kopfteilkräfte.

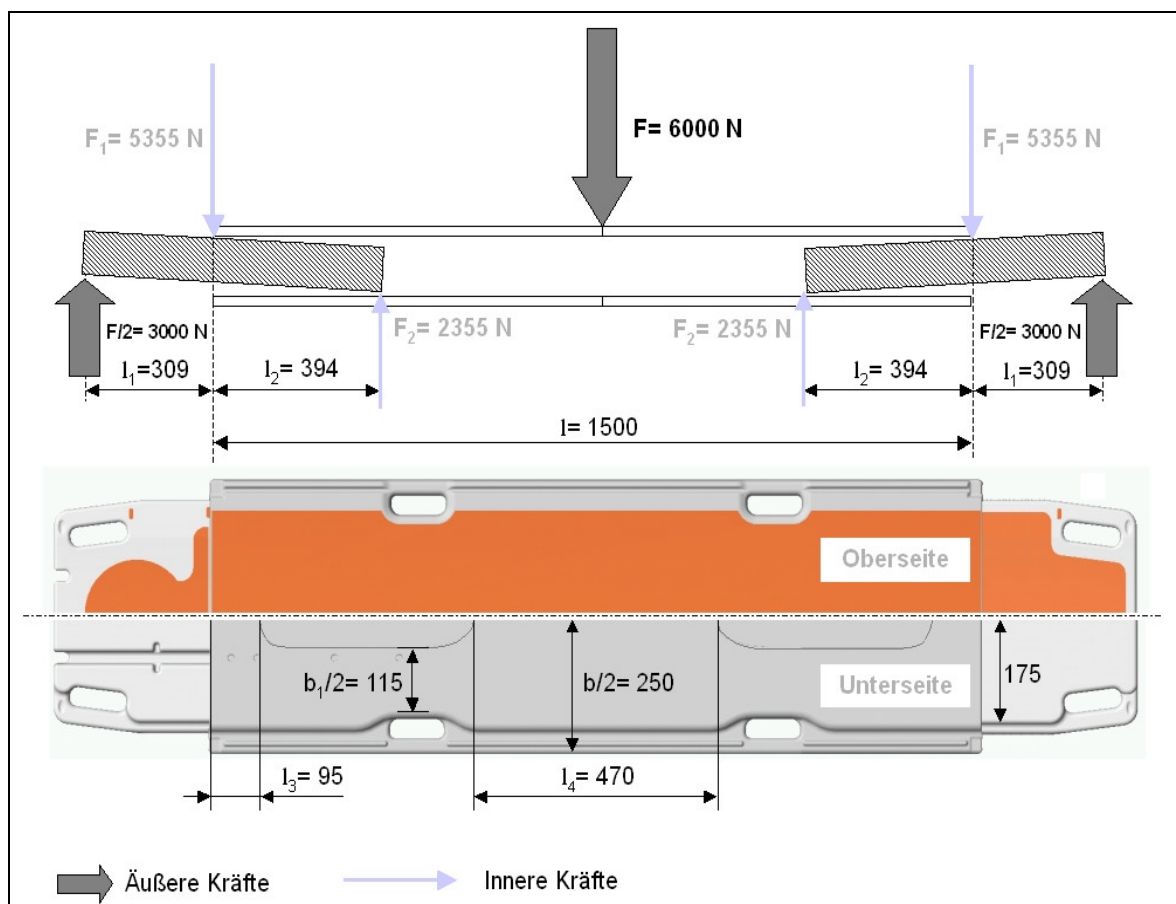


Abb. 5-1: Auflagerkräfte der Kopfteile des CCB1 infolge mittiger Punktlast

Die begrenzte Länge der Kopfteile innerhalb des Mittelteils führt zu einem ungünstigen Hebelverhältnis und damit durch die wirksamen Reaktionskräfte sowohl in den Kopfteilen als auch im Mittelteil zu hohen Biegemomenten.

Das maximale Biegemoment in den Kopfteilen beträgt:

$$M_{b, \text{Kopfteil, max}} = \frac{F}{2} \cdot l_1 = 3000 \text{ N} \cdot 0,309 \text{ m} = 927 \text{ Nm} . \quad \text{Gl. 5-1}$$

Das maximale Biegemoment im Mittelteil berechnet sich zu:

$$\begin{aligned} M_{b, \text{Mittelteil, max}} &= F_1 \cdot l_1 - F_2 \cdot \left(\frac{l}{2} - l_2\right) = 5355 \text{ N} \cdot 0,750 \text{ m} - 2355 \text{ N} \cdot 0,356 \text{ m} \\ &= 3178 \text{ Nm} . \end{aligned} \quad \text{Gl. 5-2}$$

Die Auflagerung des Mittelteils an seinen Endpunkten ergibt dagegen nur ein Biegemoment von:

$$M_{b, \text{Mittelteil, 2}} = \frac{F}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{6000 \text{ N} \cdot 1,5 \text{ m}}{4} = 2250 \text{ Nm} . \quad \text{Gl. 5-3}$$

Über **Gl. 4-4** und Gl. 4-5 auf Seite 86 können die vorhandenen Zug- bzw. Druckkräfte sowie die notwendigen Schichtdicken berechnet werden.

Mittelteil

Die Zug- /Druckkraft auf Unter-/ Oberseite in Längsrichtung beträgt:

$$\left| F_{\text{Zug, Druck, längs}} \right| = \left| \frac{M_b}{H - s} \right| = \frac{3178 \text{ Nm}}{0,042 \text{ m}} = 75,67 \text{ kN} . \quad \text{Gl. 5-4}$$

Diese Kraft muss auf der Unterseite von einer tragenden Breite von 230 mm übertragen werden (vgl. Wert „b₁“ in Abb. 5-1), wenn die Reinigungsöffnung berücksichtigt und der Seitenbereich vernachlässigt wird. Damit berechnet sich der Schnittkraftfluss zu:

$$\left| n_{\text{Zug, Druck, längs}} \right| = \left| \frac{F_{\text{Zug, Druck, längs}}}{b_1} \right| = \frac{75,67 \text{ kN}}{0,23 \text{ m}} = 329 \text{ kN/m} . \quad \text{Gl. 5-5}$$

Durch seitliche Auflagerung bzw. während des Haltens an den Griffen entsteht eine Zug- bzw. Druckkraft auch in der Querrichtung:

$$\left| F_{\text{Zug, Druck, quer}} \right| = \left| \frac{F_{\text{Griff}} \cdot b/2}{H - s} \right| = \frac{3000 \text{ N} \cdot 0,25 \text{ m}}{0,042 \text{ m}} = 17,9 \text{ kN} . \quad \text{Gl. 5-6}$$

Diese Kraft muss auf der Unterseite von einer tragenden Breite von 660 mm übertragen werden, wenn die Reinigungsöffnung berücksichtigt wird. Damit beträgt der Schnittkraftfluss:

$$|n_{\text{Zug, Druck, quer}}| = \left| \frac{F_{\text{Zug, Druck, längs}}}{2 \cdot l_3 + l_4} \right| = \frac{17,9 \text{ kN}}{0,66 \text{ m}} = 27,1 \text{ kN/m} . \quad \text{Gl. 5-7}$$

Mit diesen Schnittkraftfluss- Werten kann eine Berechnung der Schichtstärken mit Hilfe der Netztheorie (vgl. Kap. 3.5.2.1) erfolgen. Wird das Verhältnis der in Längs- und Querrichtung wirksamen Kräfte berechnet, so ergibt sich ein Wert von:

$$\frac{|n_{\text{Zug, Druck, längs}}|}{|n_{\text{Zug, Druck, quer}}|} = \frac{329 \text{ kN/m}}{27,1 \text{ kN/m}} = 12,2 . \quad \text{Gl. 5-8}$$

Der optimale Faserwinkel für eine symmetrische Anordnung der Faserrichtungen beträgt nach Gl. 3-2 auf Seite 79:

$$\beta_2 = \arctan \left[\frac{n_{II} / n_I}{\tan \beta_1} \right] \text{ mit } \beta_2 = -\beta_1 \quad \text{Gl. 5-9}$$

$$\Rightarrow \tan \beta \cdot \tan -\beta = 12,2 \Rightarrow \beta = \arctan(\sqrt{12,2}) = \pm 85,3^\circ .$$

Tatsächlich ist diese Art der Anordnung nur mit einem Wickelverfahren realisierbar. Für die Verwendung von Faserhalbzeugen in Form von Geweben oder Gelegen wird angenommen, dass der Faserwerkstoff unter 0° , 90° und 45° eingesetzt wird. Die Zugfestigkeit der HT- Kohlefaser (Akzo AG) wird bei einem Sicherheitsfaktor von $S=4$ mit 850 N/mm^2 [RUG02, S. 157] angenommen. Aus der Berechnung mit der Netztheorie nach Gl. 3-1 auf Seite 78 ergeben sich folgende Faser- Schichtstärken bzw. Flächenmassen bei reiner UD- Verstärkung:

- Es ist eine Faser-Schichtdicke von 0,39 mm bzw. eine Flächenmasse von 687 g/m^2 in Längsrichtung (0°) notwendig.
- Es ist eine Faser-Schichtdicke von 0,03 mm bzw. eine Flächenmasse von 57 g/m^2 in Querrichtung (90°) notwendig.
- Unter einem Winkel von $\pm 45^\circ$ ist keine Verstärkung notwendig.

Da die Verstärkungsrichtungen exakt mit den Richtungen der Schnittkraftflüsse übereinstimmen, können die Schichtdicken der Faserhalbzeuge auch direkt über folgenden Ansatz berechnet werden:

$$\sigma_{zul} = \frac{F}{A} = \frac{n \cdot b}{b \cdot s_{min}} = \frac{n}{s_{min}} \Rightarrow s_{min} = \frac{n}{\sigma} \quad \text{Gl. 5-10}$$

$$\Rightarrow s_{längs, min} = \frac{329 \text{ kN/m}}{850 \text{ N/mm}^2} = 0,39 \text{ mm}; s_{quer, min} = \frac{27,1 \text{ kN/m}}{850 \text{ N/mm}^2} = 0,03 \text{ mm} .$$

Bei einem Faservolumengehalt von 35 % ergibt sich damit nach der Netztheorie eine Laminatstärke von je 1,2 mm auf Ober- bzw. Unterseite.

Nach [IDA88, S.19] beträgt der höchste Dimensionierungsbruchwert für ein CFK- UD- Laminat mit einem Faservolumengehalt von mindestens 54 % zur Verwendung in Tragholmen 600 N/mm². Im optimalen Fall könnte so eine Laminatstärke von ca. 0,6 mm erreicht werden.

Nach [IDA88, S. 9f] beträgt die Zugfestigkeit für ein CFK- UD- Laminat mit einem Faservolumengehalt von 35 % 420 N/mm² und für ein 50/50-Gewebe 146 N/mm². Es ergeben sich damit Laminatstärken von 0,85 mm für das UD- Laminat bzw. 2,3 mm für das Gewebe.

Nach [RUG, S. 148] beträgt die Zugfestigkeit von Laminaten mit einem Faservolumengehalt von 50 % aus Epoxidharz und Kohlefasergeweben (CS-Interglas) mit 50/50- Verteilung 560 bis 650 N/mm² und für Kohlefaser- UD- Gelege 950 bis 1100 N/mm². Es ergeben sich damit Laminatstärken von 0,37 mm für das UD- Laminat bzw. 0,59 mm für das Gewebe.

Für die Dimensionierung des Mittelteils werden die Ergebnisse der Netztheorie verwendet, da diese den sichersten Wert darstellen. Es werden Kohlefasergelege mit einer Flächenmasse von 125 g/m² [RUG02, S. 168] und Kohlefasergewebe mit einer Flächenmasse bis ca. 200 g/m² [RUG02, S. 167] unter orthotropem Lagenaufbau eingesetzt. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die UD- Lagen die Zugkräfte übertragen und das Gewebe den Grundaufbau darstellt. Den realisierten Laminataufbau und dessen Herstellung zeigt **Abb. 6-3**.

Außer der Berechnung der Biegebelastung in Längsrichtung muss berücksichtigt werden, dass eine Wölbung der Oberseite durch deren Belastung eintritt.

Dies führt dazu, dass die Kopfteile im Mittelteil verklemmen, sofern kein ausreichendes Spiel vorhanden ist. Aus diesem Grund werden Ober- und Unterseite als Sandwichkonstruktion ausgeführt, wobei eine Wabenstruktur als Kernlage verwendet wird. Die Durchsenkung ergibt sich in Abhängigkeit der freien Biegelänge, dem E-Modul und dem vorhandenen Trägheitsmoment. Das Trägheitsmoment bei UD-Verstärkung beträgt:

$$I_{\text{Sandwich}} \approx \frac{b \cdot (H_1^3 - H_2^3)}{12} \quad \text{Gl. 5-11}$$

Mit: b : Breite der Sandwichverbindung in mm

H_1 : Gesamtdicke der Sandwichverbindung in mm

H_2 : Dicke Sandwichkern in mm

I : Flächenträgheitsmoment in mm⁴

Es wurde ein Probekörper erstellt und in der Mitte mit einer Punktlast beaufschlagt, um die Biegesteifigkeit eines Sandwichelementes zu überprüfen. Die vorhandenen Durchsenkungen wurden mit Hilfe einer Messvorrichtung aufgenommen. **Abb. 5-2** zeigt die Ergebnisse der ersten von drei Messreihen.

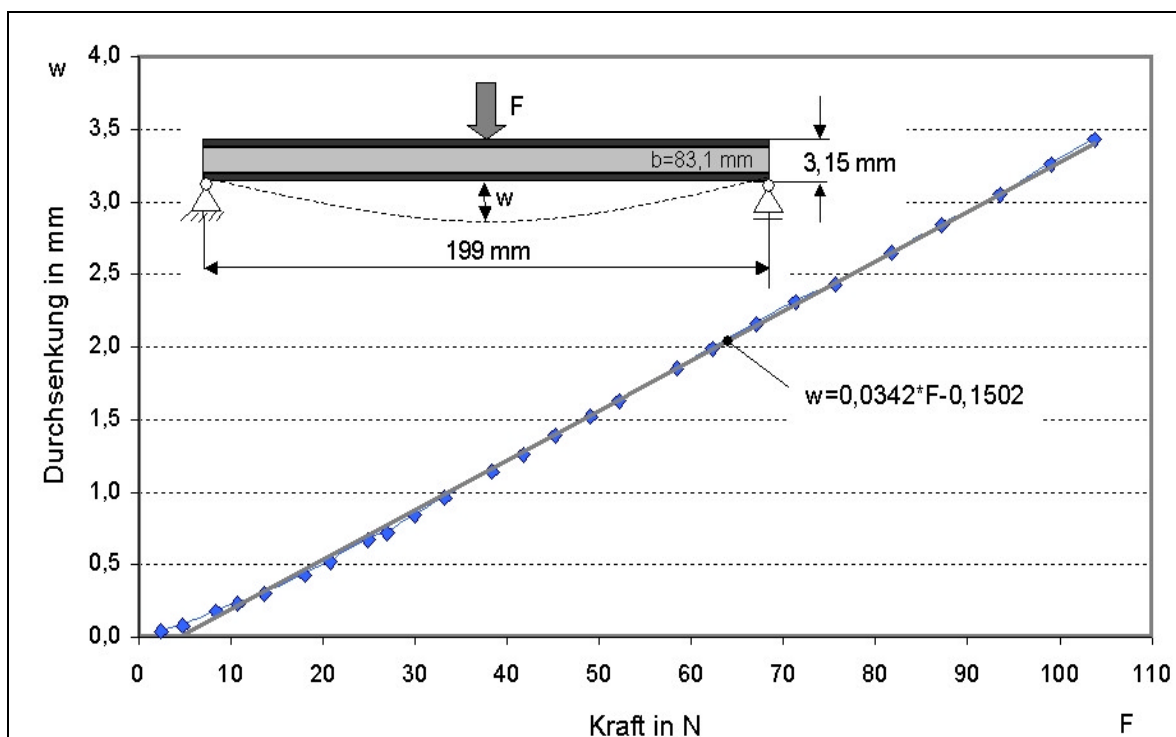


Abb. 5-2: Durchsenkung eines Sandwich- Probekörpers bei mittlerer Punktlast

Die Probe weist eine Breite von 83,1 mm, eine freie Länge von 199 mm und eine Dicke von 3,15 mm auf. Der Aufbau besteht aus einer 2 mm Wabenstruktur mit je

zwei Decklagen aus CFK-Gewebe auf der Ober- und Unterseite, die eine Flächenmasse von je 204 g/m² aufweisen. Der Faservolumengehalt des Decklaminates ergibt sich aus folgenden Einzelrechnungen:

$$H_{\text{ges.}} = 3,15\text{mm} \Rightarrow H_{\text{CFK, ges}} = 3,15\text{mm} - 2\text{mm} = 1,15\text{mm} = 2 \cdot H_{\text{CFK, oben, unten}} \quad \text{Gl. 5-12}$$

$$s_{\text{CFK, oben, unten}} = \frac{\text{Flächenmasse}_{\text{CFK, oben, unten}}}{\rho} = \frac{2 \cdot 204 \text{ g/m}^2}{1,8 \text{ g/cm}^3} = 0,226\text{mm}$$

$$\Rightarrow \text{FVG}_{\text{CFK, oben, unten}} = \frac{s_{\text{CFK, oben, unten}}}{H_{\text{CFK, oben, unten}}} = 0,394.$$

Das Flächenträgheitsmoment für den Probekörper beträgt:

$$I_{\text{Probekörper}} \approx \frac{b \cdot (H_1^3 - H_2^3)}{12} = \frac{83,1\text{mm} \cdot (3,15\text{mm}^3 - 2\text{mm}^3)}{12} = 161\text{mm}^4. \quad \text{Gl. 5-13}$$

Der E- Modul von Kohlegewebe- Laminaten beträgt nach [RUG, S. 148] im optimalen Fall ca. 58000 N/mm². Nach [IDA88, S. 10] ergibt sich der E- Modul für ein Kohlegewebe- Laminat mit einem Faservolumengehalt von 35% zu 39470 N/mm². Mit diesen Werten ergibt sich die rechnerische Federsteifigkeit des Probekörpers zu:

$$\begin{aligned} c_{\text{Probekörper}} &= \frac{F}{w} = \frac{F \cdot 48 \cdot E \cdot I}{F \cdot l^3} = \frac{48 \cdot E \cdot I}{l^3} = \frac{48 \cdot 39470 \text{ N/mm}^2 \cdot 161 \text{ mm}^4}{(199 \text{ mm})^3} \\ &= 38,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}}. \end{aligned} \quad \text{Gl. 5-14}$$

Aus den Steigungswerten der Messwerte der drei Messreihen (Abb. 5-2) ergibt sich die durchschnittliche Federsteifigkeit zu 30,2 N/mm. Das bedeutet, dass die tatsächlich vorhandene Biegesteifigkeit mindestens 20 % geringer als die berechnete ausfällt. Dies lässt sich u. a. damit begründen, dass durch den Wabenkern die Welligkeit des Decklaminates deutlich erhöht wird und damit dessen Steifigkeit abnimmt.

Abschätzung der Durchbiegung der Oberseite bei Belastung

Ein Teil des Kopf- und Fußteils des CCB1 befindet sich innerhalb des Mittelteils, dessen Oberseite sich bei Belastung durch eine liegende Person verformt. Bei zu

geringem Spiel wird dadurch das Kopfteil innerhalb des Mittelteil eingeklemmt. Es muss daher abgeschätzt werden, welches Spiel zwischen den beiden Elementen vorhanden sein muss, um eine Verklemmung zu vermeiden. Das Mittelteil weist im Bereich der Kopfteilaussparung eine freie Biegelänge in Querrichtung von 450 mm und eine wirksame Breite zwischen Griff und Außenkante von 300 mm auf. Dies ergibt unter Berücksichtigung des o. a. Sandwichquerschnitts ein theoretisches Flächenträgheitsmoment von:

$$I = \frac{b \cdot (H_1^3 - H_2^3)}{12} = \frac{300 \text{ mm} \cdot ((3,15 \text{ mm})^3 - (2 \text{ mm})^3)}{12} = 581 \text{ mm}^4 . \quad \text{Gl. 5-15}$$

Der real vorhandene Sandwich- Aufbau weist im Gegensatz zu dem des Probekörpers eine Gesamthöhe von ca. 4,5 mm auf, da die Verstärkungslagen in Längsrichtung und die Innentasche vorhanden sind, Abb. 5-3 (vgl. Abb. 6-3).

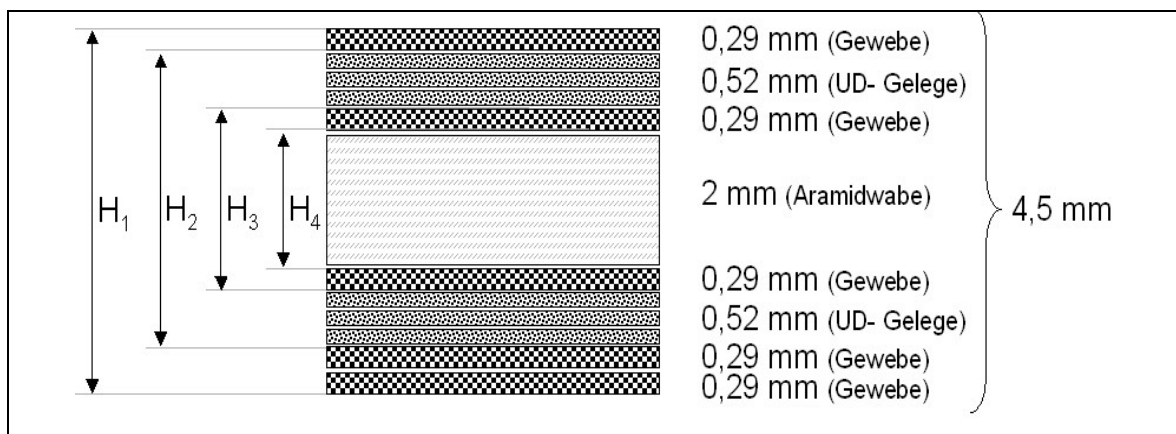


Abb. 5-3: Aufbau der Oberseite des Mittelteils im Bereich der Kopfteileinschübe

Dadurch erhöht sich das Flächenträgheitsmoment im Vergleich zu dem des Probekörpers erheblich und ergibt vereinfacht berechnet mindestens:

$$I = \frac{b \cdot (H_1^3 - H_2^3 + H_3^3 - H_4^3)}{12} \quad \text{Gl. 5-16}$$

$$= \frac{300 \text{ mm} \cdot ((4,5 \text{ mm})^3 - (3,6 \text{ mm})^3 + (2,6 \text{ mm})^3 - (2 \text{ mm})^3)}{12} = 1351 \text{ mm}^4 .$$

Die maximale Durchsenkung dieses Sandwichelementes beträgt bei Belastung in der Mitte mit einer beispielhaften Punktlast von 400 N:

$$w = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{400 \text{ N} \cdot (450 \text{ mm})^3}{48 \cdot 39470 \text{ N/mm}^2 \cdot 1351 \text{ mm}^4} = 14,2 \text{ mm.} \quad \text{Gl. 5-17}$$

Wird diese Kraft gleichmäßig über der Länge (Streckenlast) verteilt, so ergibt sich folgendes Ergebnis für die Durchsenkung:

$$w = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot 400 \text{ N} \cdot (450 \text{ mm})^3}{384 \cdot 39470 \text{ N/mm}^2 \cdot 1351 \text{ mm}^4} = 8,9 \text{ mm.} \quad \text{Gl. 5-18}$$

Die Verwendung eines 3 mm starken Sandwichkerns ergäbe Durchsenkungen von etwa 7,2 mm bei 400 N Punktlast und 4,5 mm bei Streckenlast. Ein 4 mm dicker Kern biegt sich bei Punktlast 5,8 mm und bei Streckenlast 3,6 mm durch.

Für den o.a. Laminataufbau wurde ein Spiel von 9 mm für das CCB1 realisiert.

Kopfteile

Die Kopfteile werden mit einem maximalen Biegemoment von 927 Nm (Gl. 5-1) beansprucht. Das ergibt eine wirksame Zug- /Druckkraft auf Unter-/ Oberseite von:

$$\left| F_{\text{Zug, Druck, längs}} \right| = \left| \frac{M_b}{H_{\text{Kopfteil}} - s} \right| = \frac{927 \text{ Nm}}{0,028 \text{ m} - 0,001 \text{ m}} = 34,3 \text{ kN.} \quad \text{Gl. 5-19}$$

Bezogen auf eine Breite der Unterseite von 350 mm (vgl. Abb. 5-1) ergibt dies einen Schnittkraftfluss von:

$$\left| n_{\text{Zug, Druck, längs}} \right| = \left| \frac{F_{\text{Zug, Druck, längs}}}{b_{\text{Kopfteil, unten}}} \right| = \frac{34,3 \text{ kN}}{0,35 \text{ m}} = 98 \text{ kN/m.} \quad \text{Gl. 5-20}$$

Die minimale Höhe des Kopfteils ergibt sich im Bereich des Stellhebels, **Abb. 5-4**.

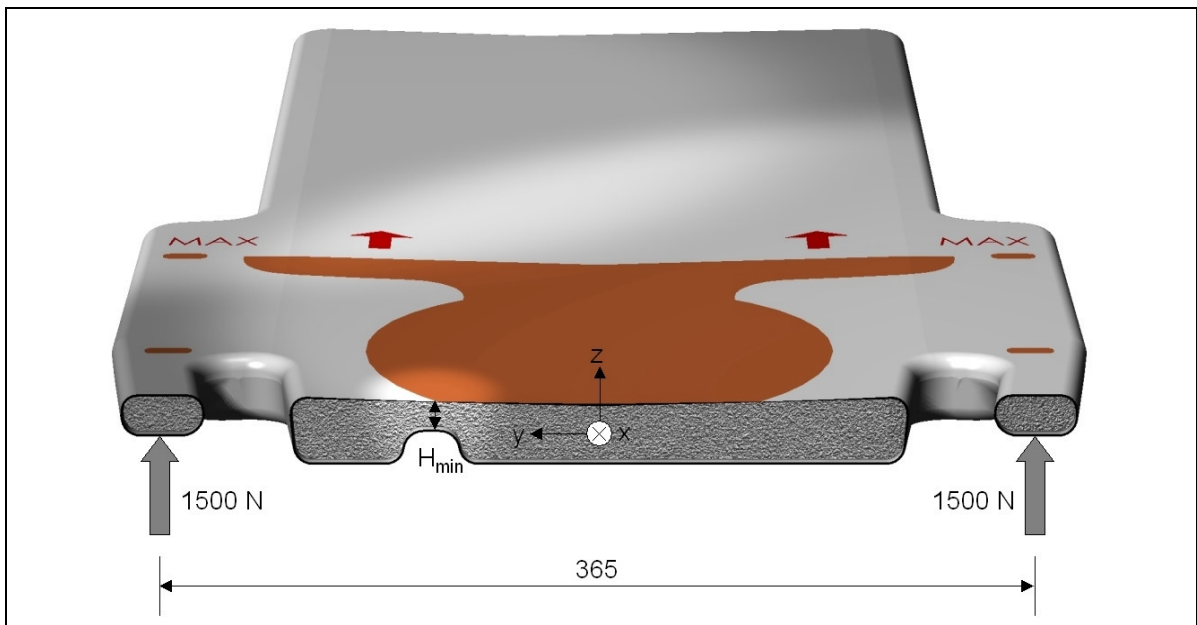


Abb. 5-4: Querschnitt durch das Kopfteil im Bereich der Griffen

Die quer auftretende Biegespannung entsteht durch Auflagerung nur an den Griffen und beträgt:

$$|F_{\text{Zug, Druck, quer}}| = \left| \frac{M_b}{H-s} \right| = \frac{1500 \text{ N} \cdot 0,365 \text{ m} / 2}{0,011 \text{ m} - 0,001 \text{ m}} = 27,4 \text{ kN} . \quad \text{Gl. 5-21}$$

Bezogen auf eine wirksame Länge von ca. 300 mm (vgl. Wert „l₁“ in Abb. 5-1) ergibt dies einen Schnittkraftfluss von:

$$|n_{\text{Zug, Druck, quer}}| = \left| \frac{F_{\text{Zug, Druck, quer}}}{l} \right| = \frac{27,4 \text{ kN}}{0,3 \text{ m}} = 91,3 \text{ kN/m} . \quad \text{Gl. 5-22}$$

Unter Verwendung der o. a. Werkstoffkennwerte (vgl. Gl. 5-10) ergibt dies nach der Netztheorie folgende UD- Schichtdicken:

- Es ist eine Faser-Schichtdicke von 0,12 mm bzw. eine Flächenmasse von 208 g/m² in Längsrichtung (0°) notwendig.
- Es ist eine Faser-Schichtdicke von 0,11 mm bzw. eine Flächenmasse von 193 g/m² in Querrichtung (90°) notwendig.
- Unter einem Winkel von ± 45° ist keine Verstärkung notwendig.

Bei einem Faservolumengehalt von 35 % ergibt sich damit nach der Netztheorie eine theoretisch notwendige Laminatdicke für beide Verstärkungsrichtungen von 0,65 mm auf der Ober- bzw. Unterseite.

Da in Längs- und Querrichtung nahezu die gleichen Werte benötigt werden, wird das verwendete Laminat nur mit Kohlefasergewebe aufgebaut.

5.1.2 Verstärkung des Mittelteils des CCB1

Durch die Biegebelastung (vgl. Abb. 5-1) werden über die Kopfteile in das Mittelteil jeweils 2 Kräfte eingeleitet, die unterschiedliche Vorzeichen besitzen und die Verbindung der Ober- und Unterseite auseinander zu reißen versuchen. Es muss daher im Bereich des Einschubs eine besonders gute Verbindung der beiden Formhälften erfolgen. Dies wird mit Hilfe von UD- Band erreicht, das um die Einschubbereiche laminiert wird. Die wirksame Kraft ist Abb. 5-1 zu entnehmen und beträgt 5355 N. Diese teilt sich auf beide Seiten auf und beträgt damit je Seite 2678 N.

Für die Auslegung wird zunächst die notwendige Rovingzahl ermittelt, da nicht der Laminatquerschnitt, sondern die Anzahl korrekt verlegter und getränkter Fasern relevant ist. Es werden Rovings der Stärke 1610 tex = 1610 g/km verwendet (Eigenschaften nach [RUG02, S. 174]).

Bei einer Dichte der Faser von 1,8 g/cm³ beträgt der Querschnitt eines Rovings:

$$A_{\text{Roving}} = \frac{1610 \text{ g} \cdot \text{cm}^3}{\text{km} \cdot 1,8 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{100.000 \text{ cm}} = 0,894 \text{ mm}^2 . \quad \text{Gl. 5-23}$$

Mit: A: Querschnittsfläche in mm²

Der notwendige Verstärkungsquerschnitt bei 4-facher Sicherheit beträgt:

$$A_{\text{Roving, erf}} = \frac{S \cdot F}{\sigma_{\text{zul}}} = \frac{4 \cdot 2678 \text{ N}}{3952 \text{ N/mm}^2} = 2,71 \text{ mm}^2 . \quad \text{Gl. 5-24}$$

Mit: σ_{zul} nach [RUG03, S. 174]

Die Anzahl der notwendigen Rovings beträgt demnach $n=3$. Wird ein UD- Band mit einer Breite von 25 mm und einer Querschnittsfläche von $A= 1,74 \text{ mm}^2$ verwendet, ergibt sich eine Anzahl von 2 je Seite.

Der Kraftangriffspunkt der berechneten Last liegt nicht direkt am Rand, sondern dort, wo der Kontakt zwischen Kopfteil und Mittelteil besteht, **Abb. 5-5**.

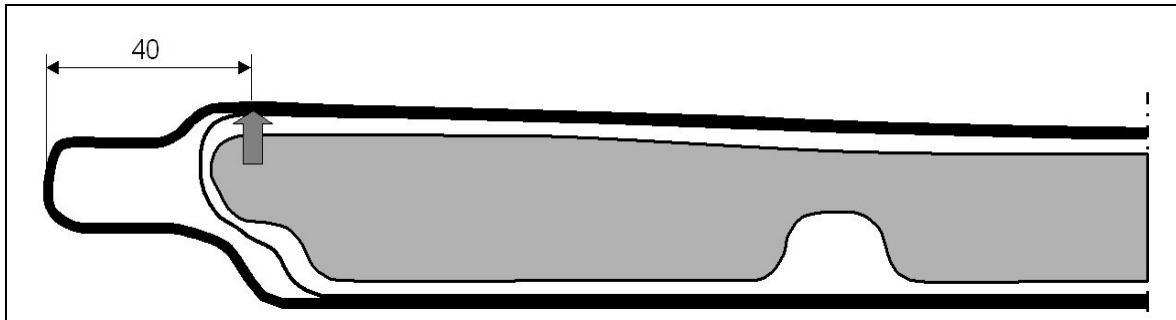


Abb. 5-5: Querschnitt durch das Kopf- und Mittelteil im Bereich der Griffe

Dadurch entstehen nicht nur reine Zugkräfte, sondern auch Biegespannungen in den Randbereichen, die zu einer deutlichen Erhöhung der notwendigen Wandstärke führen. Die Biegespannung ergibt sich aus dem Abstand des Kraftangriffspunktes zum Rand und beträgt maximal:

$$M_b = \frac{5355 \text{ N} \cdot 0,04 \text{ m}}{2} = 107 \text{ Nm} . \quad \text{Gl. 5-25}$$

Das hierfür notwendige Widerstandsmoment für ein UD- Laminat ergibt sich zu:

$$W = \frac{M_b}{\sigma_{zul}} = \frac{107 \text{ Nm}}{600 \text{ N/mm}^2} = 178 \text{ mm}^3 . \quad \text{Gl. 5-26}$$

Mit: σ_{zul} nach [IDA88, S.19] für UD-CFK- Gurte mit 54 % Faservolumengehalt

Die notwendige Höhe eines rechteckigen Gurtquerschnitts beträgt:

$$H = \sqrt{\frac{6 \cdot W}{b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 178 \text{ mm}^3}{25 \text{ mm}}} = 6,5 \text{ mm} . \quad \text{Gl. 5-27}$$

Wird diese Höhe mit UD- CFK- Band aufgebaut, das eine Breite von 25 mm und eine Flächenmasse von 125 g/m^2 aufweist, so sind bei einem FVG von 54 % ca. 51 Einzellagen dieses Bandes notwendig. In diesem Fall nimmt die Verstärkung mit dem UD- Band die gesamte Biegespannung auf. Tatsächlich ist der Seitenbereich durch die Ausschäumung und die einlamierte Innentasche

(vgl. **Abb. 6-1**) bereits verstärkt und der gesamte Seitenbereich trägt teilweise die Belastung mit. Dieser Effekt kann aber nur über numerische Methoden abgeschätzt werden.

Der für das CCB1 notwendige Wert kann somit nur zwischen 2 und 51 Lagen eingegrenzt werden. Für den Prototypen wurden 10 Lagen UD- Band verwendet, die sich als ausreichend erwiesen haben.

5.1.3 Belastungen und Schichtstärken des CCB2 und CCB3

Das CCB2 und CCB3 bestehen aus einem festen Element, das als Biegebalken angesehen werden kann, **Abb. 5-6**.

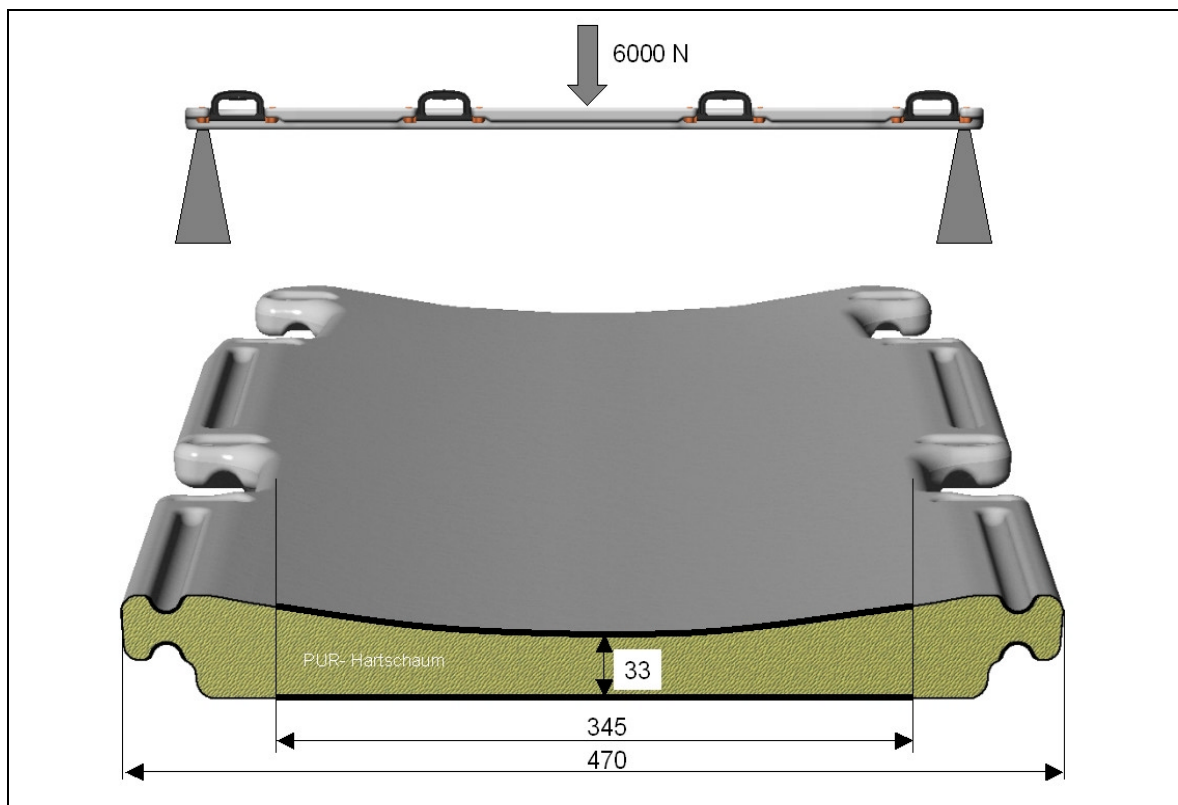


Abb. 5-6: Biegebelastung des CCB2 oder CCB3 und berücksichtigter Querschnitt

Durch Auflagerung in der Nähe des Kopf- und Fußendes ergibt sich damit die wirksame Biegespannung in Längsrichtung nach Gl. 4-3 zu:

$$M_{b, \text{längs, max}} = \frac{m \cdot g \cdot l}{4} = \frac{600 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1,95 \text{ m}}{4} = 2869 \text{ Nm} .$$

Gl. 5-28

Über **Gl. 4-4** können die vorhandenen Zug- bzw. Druckkräfte berechnet werden:

$$|F_{\text{Zug, Druck, längs}}| = \left| \frac{M_b}{H-s} \right| = \frac{2869 \text{ Nm}}{0,032 \text{ m}} = 89,7 \text{ kN} . \quad \text{Gl. 5-29}$$

Diese Kraft muss auf der Unterseite von einer tragenden Breite von 345 mm Breite übertragen werden. Damit beträgt die Zugkraft je Meter Breite:

$$|n_{\text{Zug, längs}}| = \left| \frac{F_{\text{Zug, längs}}}{b} \right| = \frac{89,7 \text{ kN}}{0,345 \text{ m}} = 253 \text{ kN/m} . \quad \text{Gl. 5-30}$$

Durch seitliche Auflagerung bzw. während des Haltens an den Griffen entsteht eine Zug- bzw. Druckkraft auch in der Querrichtung:

$$|F_{\text{Zug, Druck, quer}}| = \left| \frac{M_{b, \text{quer, max}}}{H-s} \right| = \frac{600 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,47 \text{ m} / 4}{0,032 \text{ m}} = 21,6 \text{ kN} . \quad \text{Gl. 5-31}$$

Diese Kraft muss auf der Unterseite von einer tragenden Länge von 1800 mm übertragen werden. Damit beträgt die Zugkraft je Meter Breite:

$$|n_{\text{Zug, Druck, quer}}| = \left| \frac{F_{\text{Zug, Druck, quer}}}{l} \right| = \frac{22,7 \text{ kN}}{1,8 \text{ m}} = 12 \text{ kN/m} . \quad \text{Gl. 5-32}$$

Für die Berechnung der notwendigen Schichtstärken mit der Netztheorie wird angenommen, dass der Faserwerkstoff unter 0°, 90° und 45° eingesetzt wird. Die Zugfestigkeit der HT- Kohlefaser (Akzo AG) wird bei einem Sicherheitsfaktor von $S=4$ mit 850 N/mm² [RUG02, S. 157] gewählt. Die Berechnung mit der Netztheorie ergab folgende Faser- Schichtstärken bzw. Flächenmassen für eine reine UD- Verstärkung:

- Es ist eine Faser-Schichtdicke von 0,30 mm bzw. eine Flächenmasse von 534 g/m² in Längsrichtung (0°) notwendig.
- Es ist eine Faser-Schichtdicke von 0,01 mm bzw. eine Flächenmasse von 25 g/m² in Querrichtung (90°) notwendig.
- Unter einem Winkel von ± 45° ist keine Verstärkung notwendig.

Bei einem Faservolumengehalt von 35 % ergibt sich damit eine theoretische Laminatstärke von ca. 0,9 mm auf der Ober- bzw. Unterseite.

5.2 Numerische Simulation mit der FEM

Die FEM- Simulationen von Schalenelementen, die aus Faserverbundwerkstoffen aufgebaut sind, dienen dazu, Spannungskonzentrationen in bestimmten Bereichen qualitativ festzustellen und dort deren Hauptspannungsrichtungen zu ermitteln. Auf die exakte Modellierung eines mehrschichtigen orthotropen Lagenaufbaus wurde in der Auslegungsphase verzichtet, da die quantitative Verifizierung der Ergebnisse über reale Versuche an den erstellten Prototypen erfolgt. Die numerische Berechnung dient daher für die modellierten Schalenelemente nur zur Absicherung der Vorauslegung. Über das mechanische Verhalten von Bauteilen, die aus isotropen Werkstoffen bestehen, können mit der FEM qualitative und quantitative Aussagen erfolgen.

Im Folgenden werden entscheidende Simulationen der Einzelteile des CCB3 vorgestellt. Darüber hinaus durchgeführte Simulationen sind aufgrund der notwendigen Begrenzung des Umfangs dieser Arbeit nicht dargestellt.

5.2.1 Liegenelement des CCB3

Das Liegenelement ist insbesondere auf Biegung belastet. Die Vorauslegung hierzu erfolgte in Kap. 5.1.3. Für die FEM- Simulation wurden 5 mm große Tetraederelemente mit Zwischenknoten verwendet. Diese geringe Größe konnte durch die Berechnung nur eines Viertels unter Ausnutzung der Symmetrie erreicht werden. Als Werkstoffkennwerte wurden für die Außenhülle ein E- Modul von 69000 N/mm² und eine Querkontraktionszahl von 0,35 festgelegt. Der Stützkern weist einen E- Modul von 60 N/mm² und eine Querkontraktionszahl von 0,35 auf. Er befindet sich nur im Bereich zwischen der gewölbten Auflagefläche der Oberseite und der ebenen Aufstandsfläche der Unterseite. Dadurch ergibt sich nur eine geringe Anzahl an Kontaktflächen, die als fest verbunden definiert wurden. Als Belastung wurde eine Kraft von 2000 N auf der Oberseite nur im Bereich der gewölbten Liegefläche gleichmäßig verteilt aufgebracht, das entspricht einem Druck von 12,4 kN/m² (0,124 bar).

Die **Abb. 5-7** zeigt, dass das Liegenelement auf der Oberseite (Druckseite) im Bereich der mittleren Griffenbuchtungen am höchsten belastet ist. Die

Von Mises- Vergleichsspannung erreicht dort einen Maximalwert von 354 N/mm^2 . Es gibt druck- und zugbelastete Bereiche, die in den Darstellungen der Hauptspannungswerte erkennbar sind.

Nach [IDA88, S. 9f] beträgt die Zugfestigkeit für ein CFK- UD- Laminat bei 35 % FVG 420 N/mm^2 und für ein 50/50-Gewebe 146 N/mm^2 . Bei reiner UD-Verstärkung wäre unter Berücksichtigung der Von Mises- Vergleichsspannung eine Wandstärke von 1 mm ausreichend. Da aber ein zweiachsiger Spannungszustand auftritt, muss eine Gewebeverstärkung vorhanden sein. Die Wandstärke ist daher in diesem Bereich auf ca. 2 mm zu erhöhen. Dies entspricht bei einem Faservolumengehalt von 35 % mindestens acht Einzellagen eines Kohlefaser-gewebes mit einer Flächenmasse von 160 g/m^2 .

Auf der Unterseite (Zugseite) ergeben sich keine kritischen Bereiche.

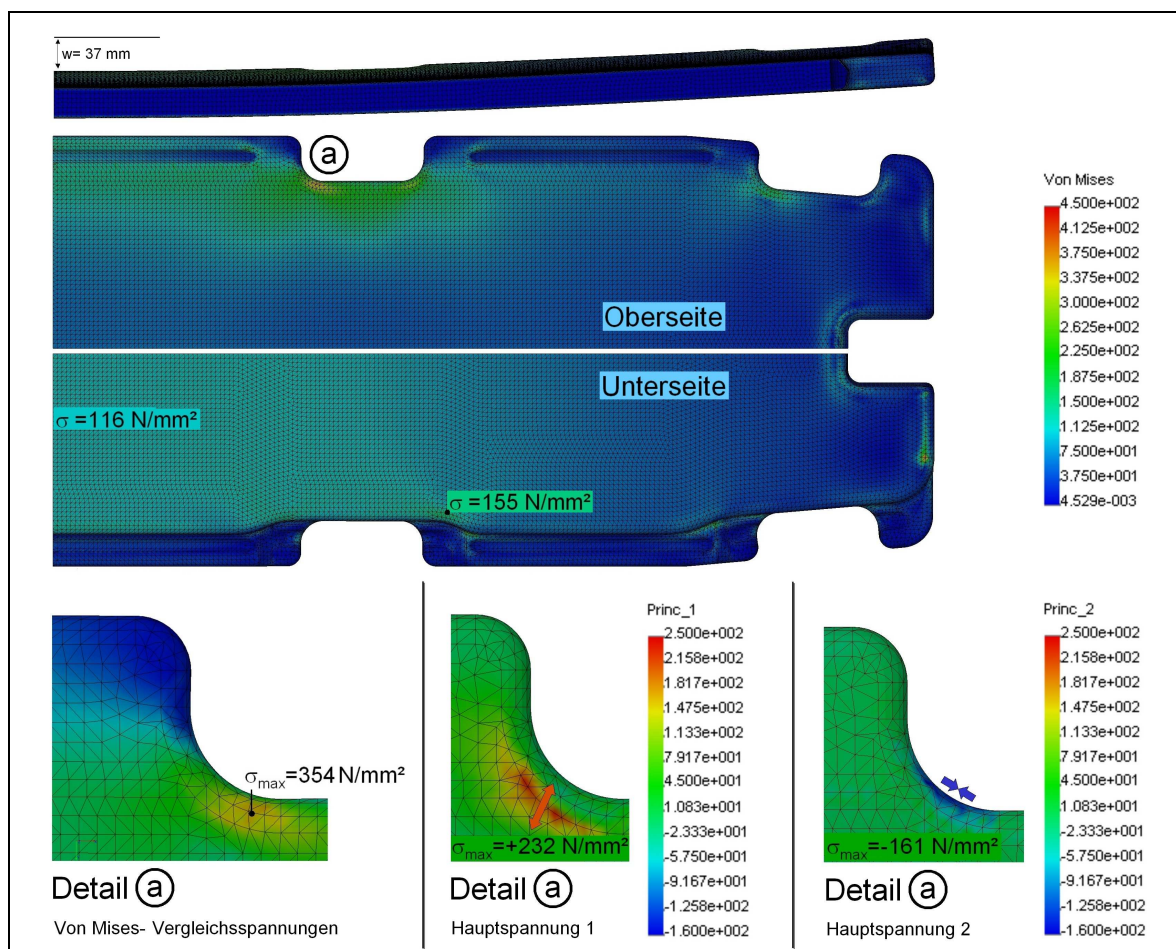


Abb. 5-7: FEM- Simulation des CCB3 unter einer gleichmäßigen Belastung mit 2000 N ($\approx 12,4 \text{ kN/m}^2$) bei einer Wandstärke von $s = 1 \text{ mm}$; oben: verformter Zustand in der Seitenansicht und Von Mises- Vergleichsspannungen der Ober- und Unterseite, unten links: Detail „a“ mit Von Mises- Vergleichsspannungen, unten rechts: Detail „a“ mit Hauptspannung 1 und 2

5.2.2 Arretierung des Tischaufsatzes

Der Tischaufsatz muss in der Lage sein, das Gewicht der befestigten Einheiten unter Berücksichtigung verschiedener Belastungszustände sicher zu tragen. Je nach Winkellage des Tisches zur Richtung der Erdbeschleunigung wirkt die Gewichtskraft der montierten Geräte sowohl in Richtung der Tischbeine als auch in Querrichtung dazu. Der Tischaufsatz wird mit einem maximalen Gewicht von ca. 250 N beaufschlagt. Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von $S=4$ ergibt sich damit eine maximal zu ertragende Gewichtskraft von 1000 N in senkrechter Richtung. Die maximale Querbelastung wird mit 500 N angenommen. **Abb. 5-8** zeigt den Tischaufsatz mit den angenommenen Kräften.

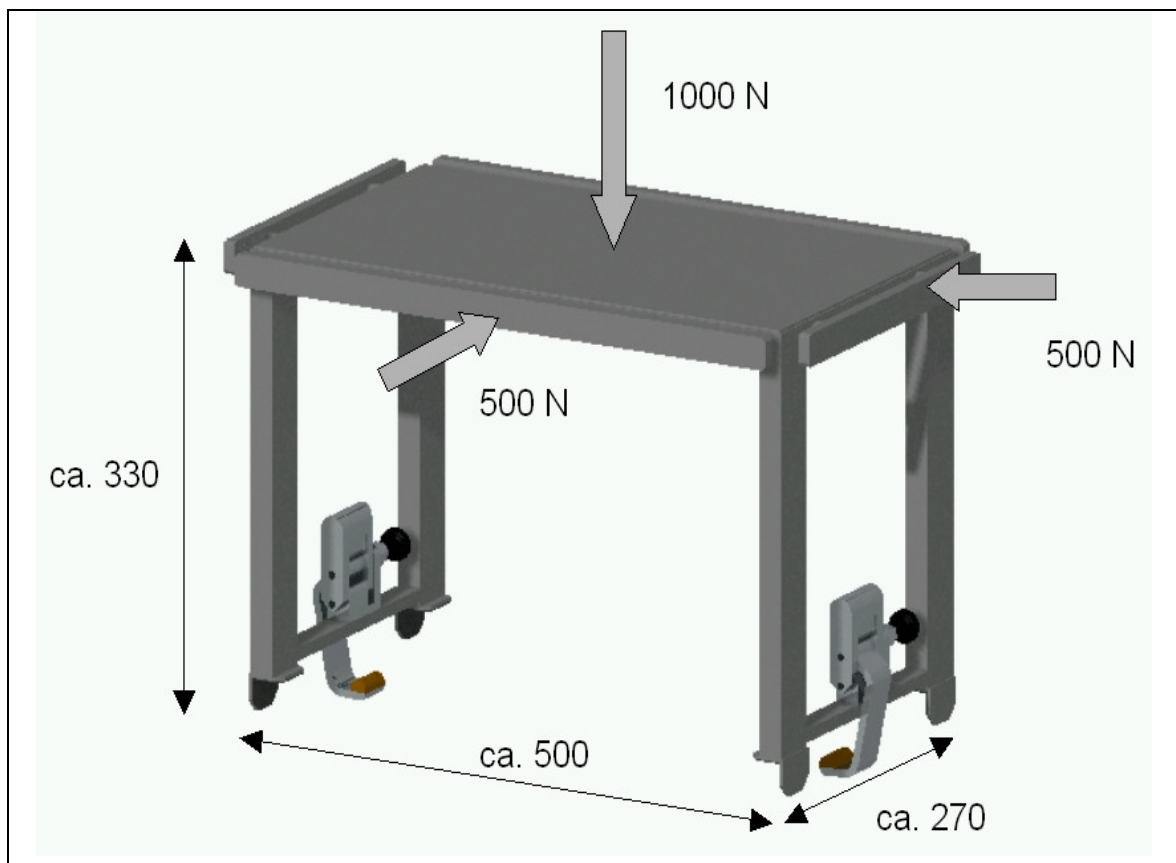


Abb. 5-8: Realisierter Tischaufsatz des CCB3 und daran angreifende Kräfte

Für den sicheren Sitz des Tischaufsatzes ist eine Vorspannung des Arretierungsmechanismus notwendig. Ein Abheben der Füße von dem Liegenelement darf bei normalem Gebrauch nicht auftreten. Eine Zugbelastung tritt an dem Arretierungsmechanismus entweder bei einer auf den Tisch wirkenden Zugkraft in senkrechter Richtung nach oben oder bei Belastung in

Quer- oder Längsrichtung auf. Bei senkrechter Zugkraft nach oben teilt sich diese Kraft auf die zwei Arretierungen jeweils zur Hälfte auf. Bei Belastung in Querrichtung ist eine Seite des Tisches auf Druck belastet, während die Arretierung der anderen Seite auf Zug belastet wird. Aus dem Momenten-Gleichgewicht im Auflagerpunkt der druckbelasteten Seite ergibt sich die auf den zugbelasteten Arretierungsmechanismus wirksame Kraft zu:

$$F_{\text{Zug, Arretierung}} = \frac{F_q \cdot H}{b} = \frac{500 \text{ N} \cdot 330 \text{ mm}}{500 \text{ mm}} = 330 \text{ N} . \quad \text{Gl. 5-33}$$

Bei Belastung in Längsrichtung beträgt die auf beide Arretierungen wirksame Zugkraft:

$$F_{\text{Zug, Arretierung}} = \frac{F_l \cdot H}{T/2} = \frac{500 \text{ N} \cdot 330 \text{ mm}}{270 \text{ mm}/2} = 1222 \text{ N} . \quad \text{Gl. 5-34}$$

Diese Kraft teilt sich auf beide Arretierungen auf, wodurch je Arretierung eine Zugkraft von 611 N entsteht. Die Vorspannkraft der Arretierung muss demnach mindestens 611 N betragen.

Die Federsteifigkeit des Arretierungsmechanismus kann mit Hilfe der FEM aus den Verschiebungen bestimmt werden, **Abb. 5-9**. Die in der Abbildung dargestellte Simulation wurde nicht mit der berechneten Vorspannkraft, sondern mit einer beispielhaften Zugbelastung von 1000 N durchgeführt. Für diesen Wert tritt eine nur sehr geringe Verformung von ca. 1,1 mm auf. Diese entsteht insbesondere durch die Verformung der Klammer und der Traverse. Die Federsteifigkeit beträgt daher:

$$c_{\text{Arretierung}} = \frac{F}{w} = \frac{1000 \text{ N}}{1,1 \text{ mm}} = 909 \text{ N/mm} . \quad \text{Gl. 5-35}$$

Entscheidend für die hohe Federsteifigkeit ist, dass die Tischbeine sehr steif sind und sich bezüglich der Quertraverse nahezu wie eine feste Einspannung verhalten. Die Federsteifigkeit der Gummierung wurde aufgrund der großen Aufstandsfläche und der geringen Dicke vernachlässigt.

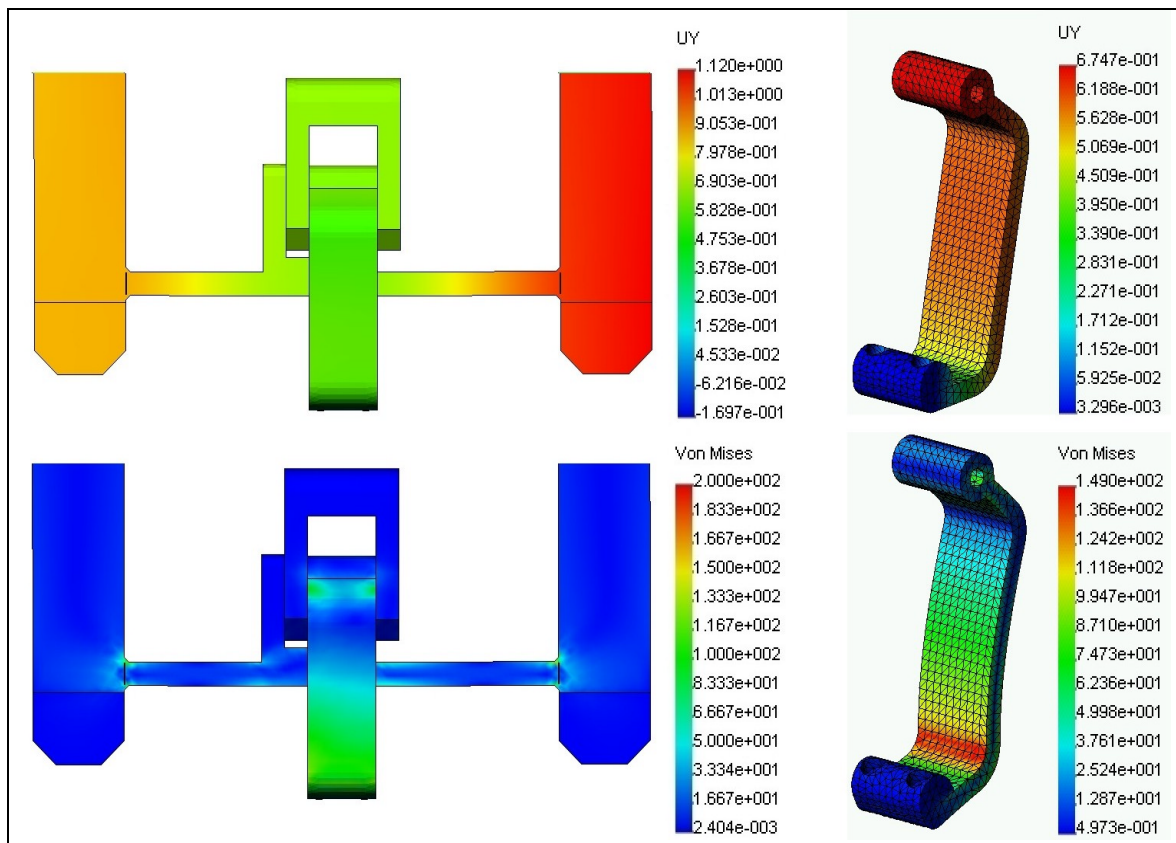


Abb. 5-9: FEM- Simulation einer senkrecht an der Arretierung des Tischaufsatzes angreifenden beispielhaften Kraft von 1000 N; oben links: Verschiebungen in senkrechter Richtung, unten links: Von Mises -Vergleichsspannungen (EG= 5 mm, E=69000 N/mm²), rechts oben und unten: verfeinertes Modell der Klammer unter gleicher Belastung mit Verformung und Von Mises- Vergleichsspannung (EG= 3 mm, E=69000 N/mm²)

Die in Abb. 5-9 rechts dargestellte verfeinerte Einzelsimulation der Arretierungsklammer zeigt auch, dass Vergleichsspannungen von ca. 150 N/mm² erreicht werden. Das notwendige Übermaß des Arretierungsmechanismus lässt sich mit Hilfe der Federsteifigkeit berechnen:

$$w_{\text{Arretierung}} = \frac{F}{c} = \frac{611\text{N}}{909\text{N/mm}} = 0,67\text{ mm} . \quad \text{Gl. 5-36}$$

Erst bei einer Gesamtverformung von 1,8 mm wird die Streckgrenze von 250 N/mm² der verwendeten Aluminium- Legierung AlMgCuPb der Klammer erreicht.

Es kann somit trotz der Vorspannung eine maximale zusätzliche Zugkraft von 1000 N von dem Arretierungsmechanismus ertragen werden.

5.2.3 Kopfhaltereinschub

Der Kopfhaltereinschub des CCB3 wird bei Belastung der eingeschobenen CT- Kopfschale mit zwei Kräften beaufschlagt. Diese lassen sich aus dem Kräfte- und Momenten- Gleichgewicht der Kopfschale errechnen. Für einen Abstand von 156 mm von der Einschub- Außenkante und einer Einspannlänge von 65 mm ergeben sich die wirksamen Kräfte zu 680 N an der Außenkante und 480 N an der Innenkante, **Abb. 5-10**.

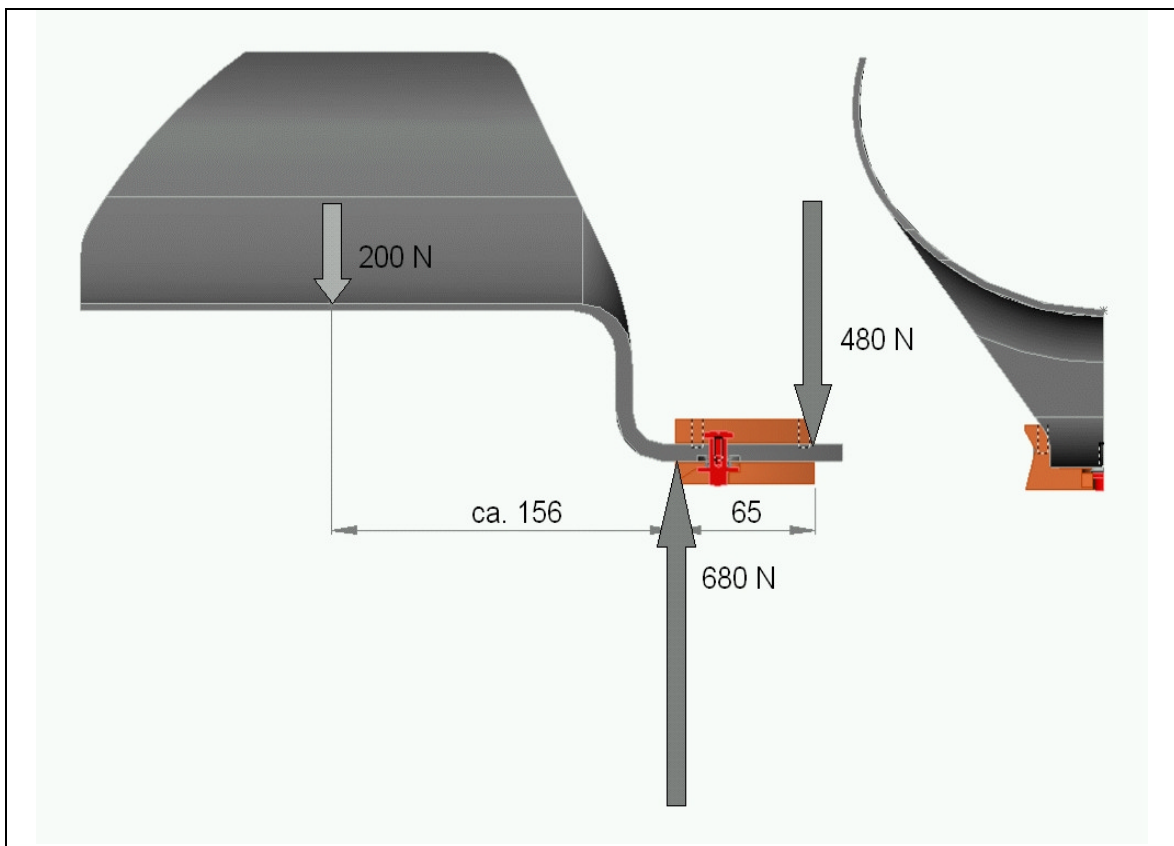


Abb. 5-10: Belastung der CT-Kopfstütze mit 200 N und resultierende Auflagerkräfte

Es ist zu prüfen, ob der Formschluss zwischen Liegenelement und Einschub trotz der auftretenden Verformung ausreicht und sich die auftretenden Spannungen dabei innerhalb der zulässigen Werte bewegen. Für die Simulation wurde das Kopfteil zu einem Biegebalken mit einer Breite von 49 mm und einer Höhe von 8 mm vereinfacht. Der Kraftangriffspunkt an der Außenkante ist 156 mm von der Einspannstelle entfernt. Zwischen Kopfteil und Einschub ist auf jeder Seite ein seitliches Spiel von 0,75 mm vorhanden. Die 12 Kontaktflächen der Einzelteile sind über Randbedingungen miteinander so verknüpft, dass eine reibungsfreie

Relativbewegung ohne Durchdringen dieser Flächen ermöglicht wird. Der Kopfhaltereinschub wird ohne Deckel berechnet, der noch zusätzliche Festigkeitsreserven bietet. Der Ausschnitt des Liegenelementes mit einer Wandstärke von 1 mm ohne stützenden Schaumkern ist an den Außenflächen fest eingespannt.

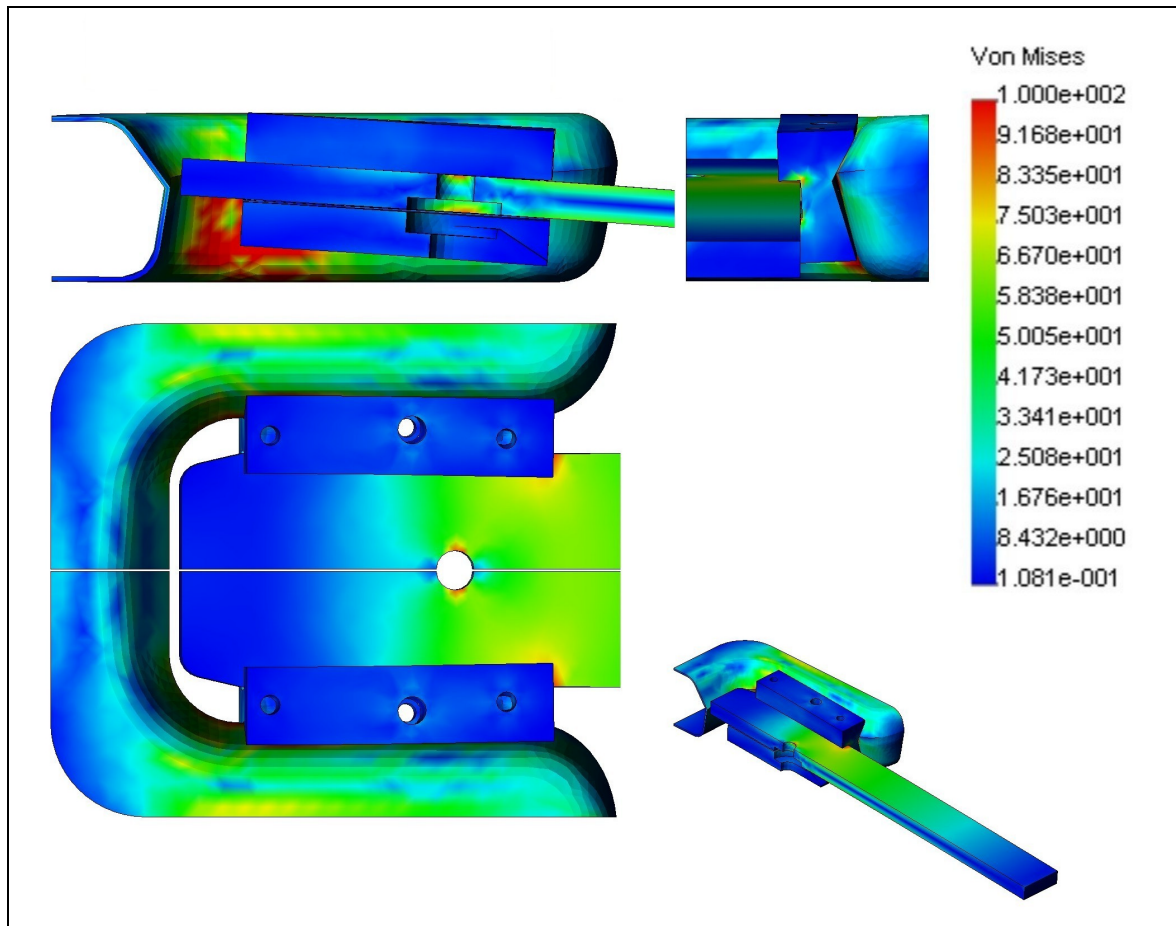


Abb. 5-11: FEM- Simulation des Einschiebeelementes und des mit 200 N am Endpunkt belasteten Kopfteils; Darstellung der Von Mises- Vergleichsspannungen

Die Simulation in **Abb. 5-11** zeigt, dass im Kopfteil im Bereich der Einspannstelle Vergleichsspannungen von ca. 64 N/mm² auftreten. Diese Spannung kann auch analytisch nach Gl. 4-8 berechnet werden und beträgt:

$$s_{b, \max} = \frac{M_b}{I} \cdot z_{\max} = \frac{200 \text{ N} \cdot 156 \text{ mm}}{\frac{49 \text{ mm} \cdot (8 \text{ mm})^3}{12}} \cdot 4 \text{ mm} = 60 \text{ N/mm}^2 . \quad \text{Gl. 5-37}$$

Es ergibt sich daher eine gute und sichere Näherung der numerischen Simulation zur analytischen Lösung. Die Vergleichsspannungswerte des Kopfhaltereinschubs betragen nur in einem kleinen Bereich an der Einspannstelle ca. 60 N/mm².

In den anderen Bereichen ist das Element nur sehr gering belastet. Durch die Belastung verformt sich der gesamte Einschub zur Mitte hin und berührt schließlich auch seitlich das Kopfteil. Eine weitere Verformung des Einschubs zur Mitte wird dann durch das massive Kopfteil stark erschwert. Die Möglichkeit des Abdrehens bzw. Abfallens ist bei einer Kraft von 200 N noch nicht gegeben.

In einer weiteren Simulation wurde das seitliche Spiel zwischen Kopfteil und Einschub auf insgesamt 0,5 mm reduziert. Hierdurch traten insgesamt geringere Vergleichsspannungen auf. Die Verformung am Endpunkt reduzierte sich gegenüber der Simulation mit 1,5 mm seitlichem Spiel von 14,8 mm auf 12,2 mm, **Abb. 5-12.**

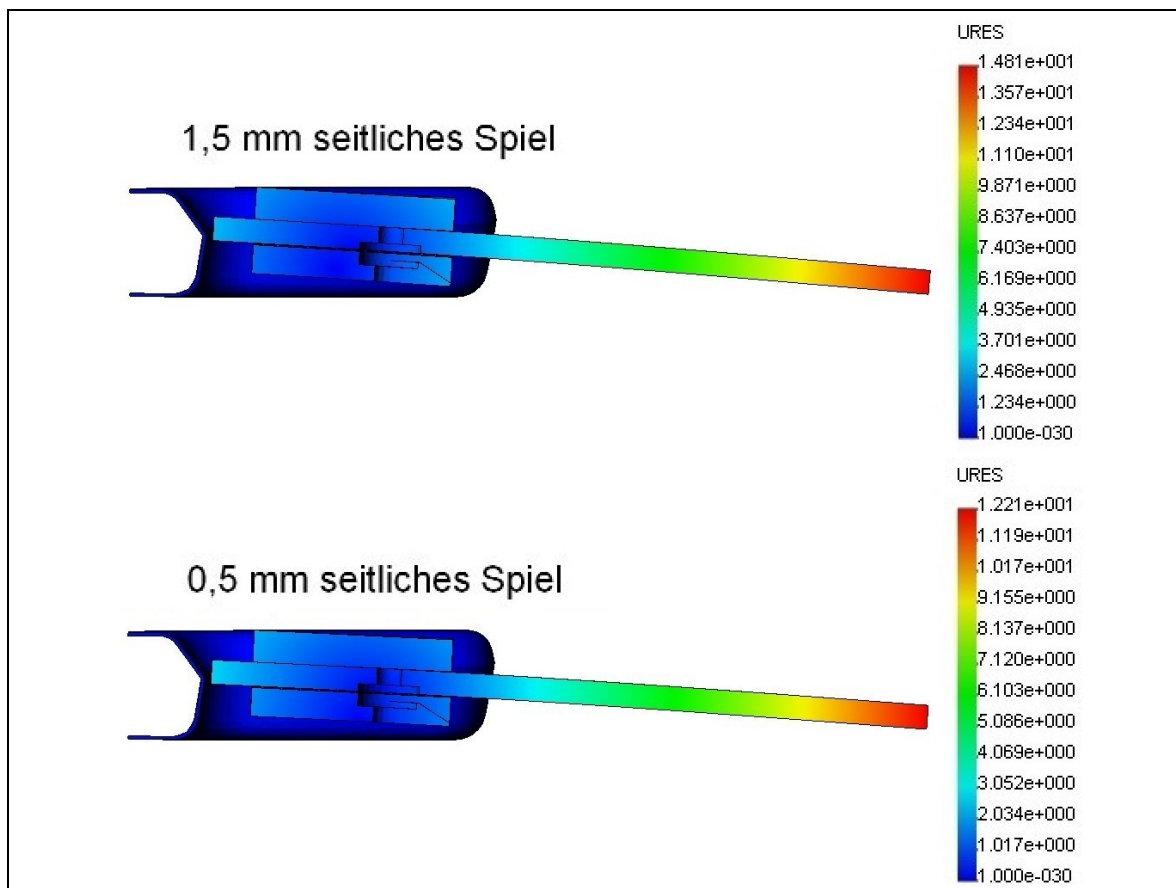


Abb. 5-12: FEM- Simulation des Einschubelementes und des mit 200 N am Endpunkt belasteten Kopfteils; Darstellung der Verschiebungen bei 1,5 und 0,5 mm seitlichem Spiel

Für eine hohe Steifigkeit und Sicherheit ist es daher notwendig, dass das seitliche Spiel zwischen Kopfteil und Einschub ca. 0,5 mm beträgt und dass der Kopfhaltereinschub spielfrei in das Liegenelement eingepasst ist.

5.2.4 Kopfhalter

Der Kopfhalter wird bei bestimmungsgemäßer Verwendung nur mit geringen Kräften beaufschlagt. Er dient insbesondere der Ruhigstellung des Kopfes für die CT-Aufnahme. Die Steifigkeit des Kopfhalters ist so hoch ausgelegt, dass kein Druckgefühl am Kopf entsteht. Die Festigkeit muss so groß sein, dass eine seitliche Belastung mit 100 N ertragen werden kann.

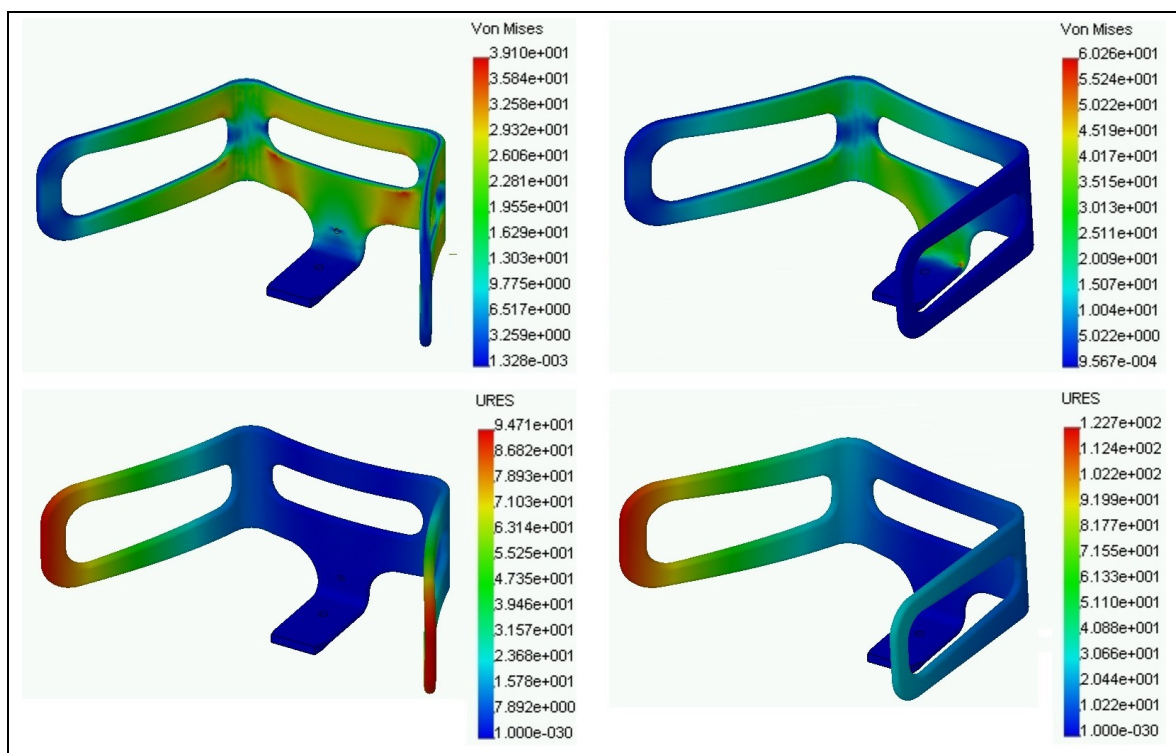


Abb. 5-13: FEM- Simulation des Kopfhalters bei Belastung mit 100 N in Querrichtung, links: beidseitig, rechts: einseitig (Elementgröße 6 mm, $E=2400\text{N/mm}^2$); Darstellung der Von Mises-Vergleichsspannungen

Die FEM- Simulation in **Abb. 5-13** zeigt, dass die Spannungen knapp unterhalb der Streckspannung von Polycarbonat liegen. Die Federsteifigkeit des Halters beträgt etwa 1 N/mm für einen Kraftangriffspunkt an der Vorderkante.

5.2.5 Griffe und Griffbefestigung

Die Griffe des CCB3 sind in mit dem Liegenelement verschraubten Haltestücken drehbar gelagert, **Abb. 5-14**.

Die Verschraubung besteht auf jeder Seite aus zwei Kunststoffschrauben DIN963- M8x35 6.6 PA und zwei Kunststoffmuttern.

Wird das Liegenelement bestimmungsgemäß mit der gewölbten Seite nach oben verwendet, besitzt die auf den Griff wirksame Zugkraft hauptsächlich einen Kraftanteil in senkrechter Richtung nach oben und einen Anteil in Querrichtung nach außen. Bei nicht bestimmungsgemäßer Verwendung wird das Liegenelement mit der Unterseite nach oben verwendet, wodurch die Schraubenverbindung auf Zug belastet wird. Die dabei maximal auftretende Zugkraft wird in Anlehnung an [DIN99, S. 11] auf 2500 N festgelegt. Dies entspricht der Kraft, die die Griffe eines Tragetuches ertragen können müssen. Bei längs angreifender Kraftrichtung ist eine Kraft von 1000 N zu ertragen. Diese beiden Werte werden für die Simulation verwendet.

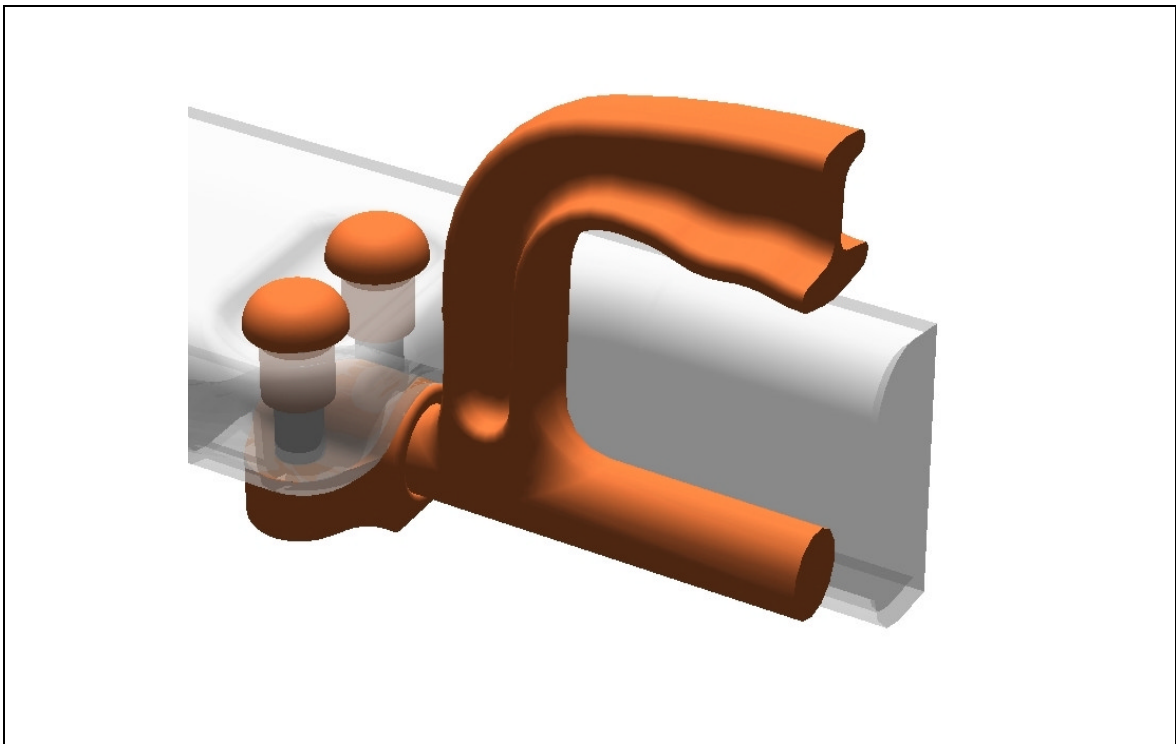


Abb. 5-14: Griffbefestigung CCB3

Die folgenden FEM- Simulationen werden zeigen, dass ein Griff aus CFK, der mit Endlosfasern aufgebaut wird, mit oder ohne Zwischenstange geeignet ist, die angreifenden Belastungen zu ertragen. Ein CFK- Griff mit Langfaserverstärkung weist eine geringere Steifigkeit und Festigkeit auf und kann nur mit durchgehender Stange verwendet werden. Ein unverstärkter Kunststoffgriff kann die gegebenen Belastungen nicht ertragen. Aus rein funktionaler Sicht ist die Variante mit durchgehender Stange günstiger.

Für die FEM- Simulationen wurde nur ein Viertel der gesamten Griffverbindung modelliert und in den Randbedingungen wurden zusätzliche Lagerungen in den Symmetrieebenen eingefügt. Zwischen Griff und Griffbefestigung wurde eine Kontaktbedingung eingefügt, die ein Abgleiten der Flächen zueinander erlaubt und gleichzeitig die Kraftübertragung ermöglicht. Die Elementgröße der verwendeten Tetraederelemente mit Zwischenknoten beträgt 3 mm, im Kontaktbereich 2 mm.

Abb. 5-15 zeigt drei Ansichten des verwendeten FEM- Netzes.

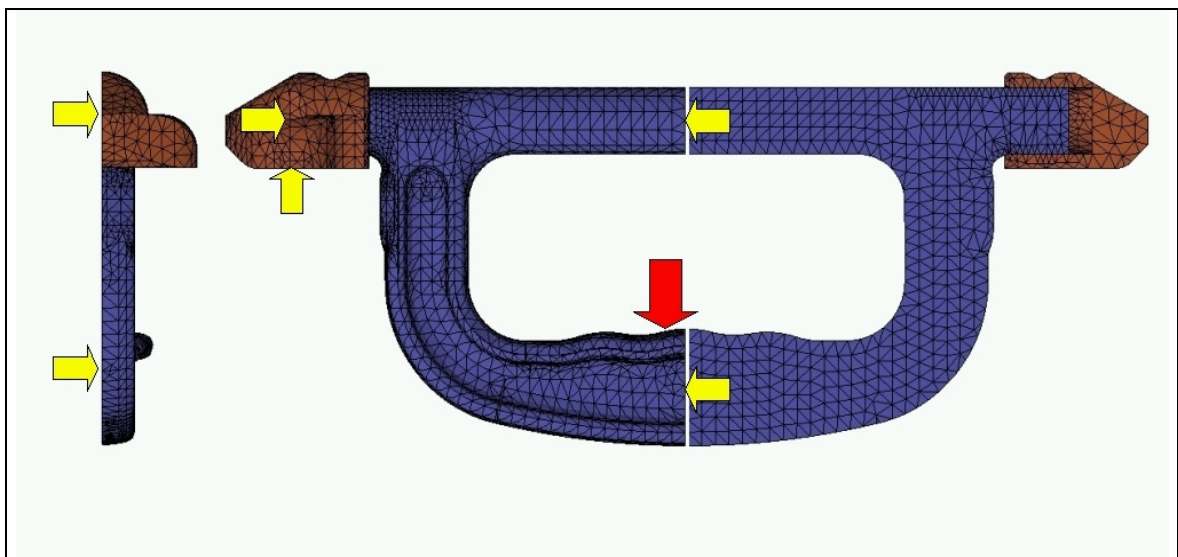


Abb. 5-15: FEM- Netz und Randbedingungen

Die erste FEM- Simulation in **Abb. 5-16** zeigt die beiden Elemente unter einer Zugbelastung von 2500 N bezogen auf die komplette Verbindung. Die Zugkraft greift mittig am Griff an und zeigt nach unten.

Für das Griffhaltestück wurde der isotrope Werkstoff Acryl mit einem E- Modul von 2400 N/mm² aus der Materialbibliothek ausgewählt. Für den Griff wurde ein E- Modul von 70000 N/mm² gewählt. Diese Steifigkeit wird von einem

endlosfaserverstärktem CFK- UD- Laminat bei einem FVG von 35% mindestens erreicht. Der gewählte isotrope Werkstoff stellt eine starke Vereinfachung des tatsächlich realisierten anisotropen Werkstoffs dar. Die Ergebnisse sind daher fehlerbehaftet und dienen nur zur Vorauslegung, die im praktischen Versuch verifiziert werden muss.

Der hohe E- Modul des Griffwerkstoffs und die Querstange bewirken, dass der Kraftangriffspunkt dicht an der Schraubenverbindung liegt und das Griffhaltestück damit nur geringfügig belastet wird. Abb. 5-16 zeigt die Von Mises- Vergleichsspannungsverteilung.

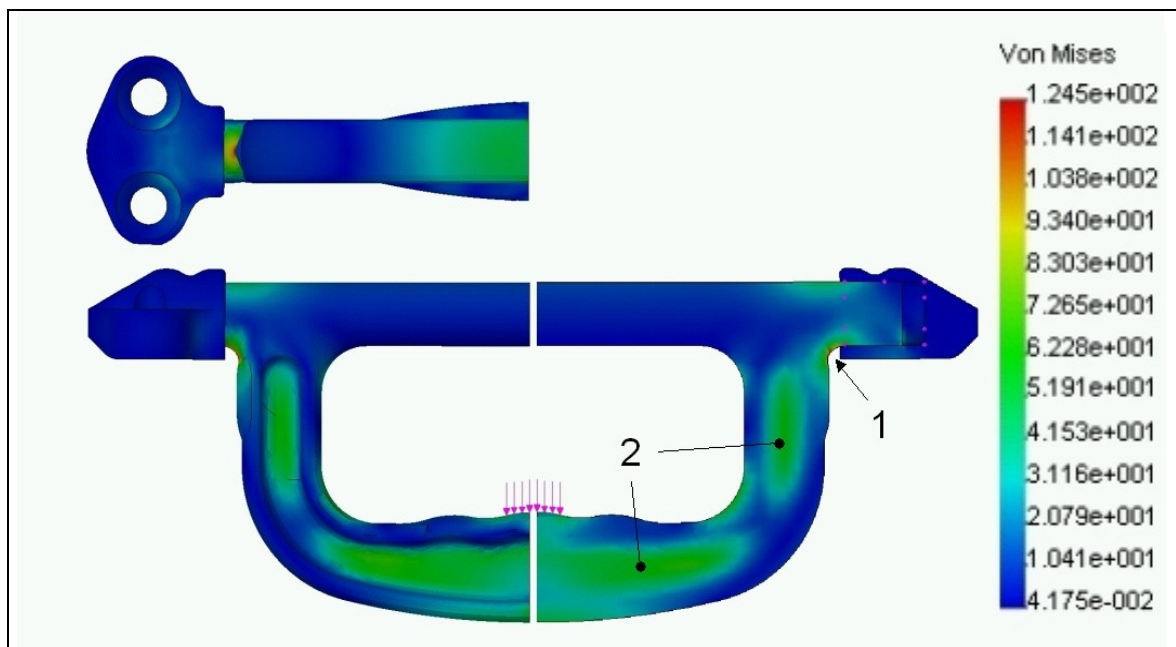


Abb. 5-16: FEM- Simulation des Griffs mit durchgehender Stange und des Griffhaltestücks; Darstellung der Von Mises- Vergleichsspannungen ($E_{\text{Griff}}=70000 \text{ N/mm}^2$)

Die Richtung der größten Hauptspannungswerte im Bereich 1 der Abbildung verläuft parallel zum realisierten Faserverlauf. Entlang des dünneren Mittelbereiches des Griffes im Bereich 2 der Abbildung verlaufen die Hauptspannungen nicht entlang des Faserverlaufes, sondern unter 45° , was einer Schubbelastung entspricht. Die Fasern sind dort nur zum Teil in der Lage, die entstehenden Spannungen aufzunehmen. Prinzipiell ist es bei der Einzelfertigung der Griffe möglich, im Mittelbereich die Fasern entsprechend einzulegen. Für eine Serienfertigung ist dieses Vorgehen aber zu aufwändig. Die Dicke des Mittelbereiches ist daher so gewählt, dass eine Überbeanspruchung auch ohne

zusätzliche Verstärkung vermieden werden kann. Die Höhe der maximalen Vergleichsspannung beträgt 124 N/mm^2 , was bezüglich des möglichen Zugfestigkeitswertes von 420 N/mm^2 [IDA88, S. 9] bei Endlosfaserverstärkung eine ausreichende Sicherheit ergibt. Diese zusätzliche Sicherheit ist insbesondere für die Prototypen notwendig, da die im Handlaminierverfahren hergestellten Griffe Schwankungen in der Position der Faserrovings aufweisen können. Bei Verwendung des Griffs ohne Querstange ergibt sich eine sehr ähnliche Vergleichsspannungsverteilung sowohl für den Griff als auch für das Haltestück. Diese wird daher nicht dargestellt. Es sind somit bei Endlosfaserverstärkung beide Grifftypen einsetzbar.

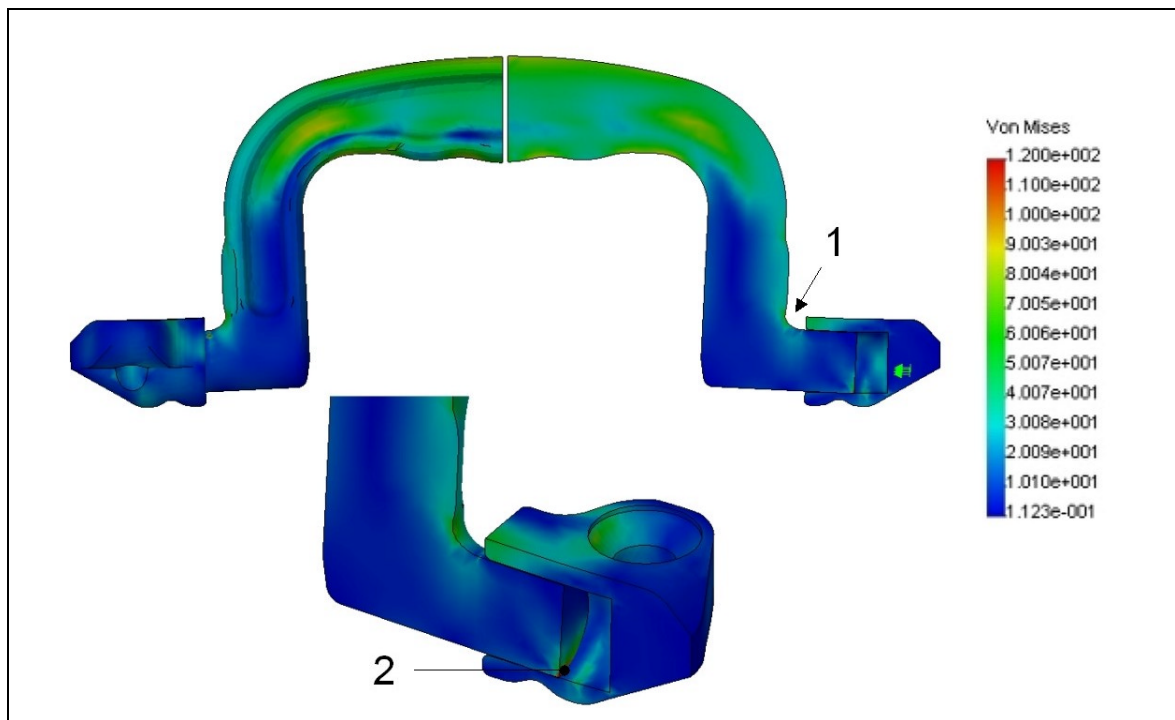


Abb. 5-17: FEM- Simulation des Griffs mit reduziertem E- Modul ohne durchgehende Stange und des Griffhaltestücks ($E_{\text{Griff}}=10000 \text{ N/mm}^2$); Darstellung der Von Mises- Vergleichsspannungen

Wird der Griff im Spritzgussverfahren mit einem langfaserverstärktem thermoplastischen Kunststoff wie z.B. PA 66 CF 20 (vgl. Abb. 3-6) hergestellt, so sinkt der erzielbare E- Modul im Vergleich zur endlosfaserverstärkten Variante stark ab. Für die in **Abb. 5-17** dargestellte FEM- Simulation wurde der E- Modul des Griffwerkstoffs daher auf 10000 N/mm^2 reduziert. Das entspricht dem Wert, der von einem langfaserverstärkten Thermoplast mindestens erreicht werden kann. Die maximale Vergleichsspannung tritt in Abb. 5-17 nun an der Außenkante

des Griffs im Bereich 2 mit punktuell ca. 225 N/mm² auf, insgesamt verlagert sich der Kraftangriffspunkt durch die größere Verformung weit in Richtung des Bereiches 1, die maximalen Vergleichsspannungen sinken daher gegenüber der endlosfaserverstärkten Variante (vgl. Abb. 5-16) in diesem Griffbereich von 125 auf 70 N/mm² ab. Durch die Verlagerung des Kraftangriffspunktes steigen allerdings auch die auf das Griffhaltestück wirkenden Belastungen auf ca. 70 N/mm² an, was für einen unverstärkten Werkstoff wie PA 66 bereits oberhalb der Zugfestigkeitsgrenze liegt. Die Möglichkeit der Verwendung eines Griffs aus langfaserverstärktem Thermoplast ohne Zwischenstange und eines Griffhaltestücks aus unverstärktem Thermoplast kann daher durch die Simulation nicht bestätigt werden.

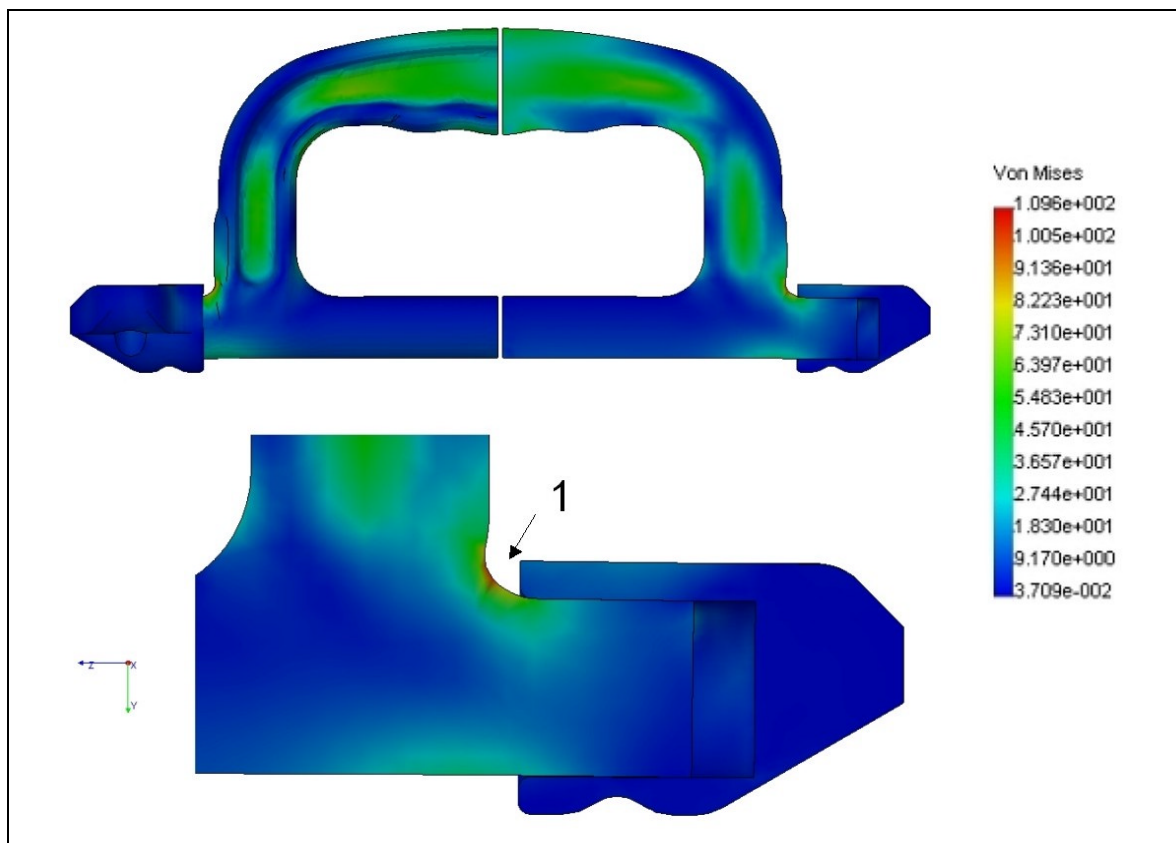


Abb. 5-18: FEM- Simulation des Griffs mit reduziertem E- Modul, durchgehender Stange und des Griffhaltestücks ($E_{\text{Griff}}=10000 \text{ N/mm}^2$); Darstellung der Von Mises- Vergleichsspannungen

Ist die Zwischenstange vorhanden, so ergibt sich in der FEM- Simulation nach **Abb. 5-18** eine maximale Vergleichsspannung von ca. 110 N/mm² im Bereich 1. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich der Kraftangriffspunkt bei höherer Steifigkeit des Griffs weiter nach außen verlagert. Die im Griffhaltestück

auftretenden Vergleichsspannungen liegen unter 50 N/mm^2 . Die Griffvariante mit Stange kann daher voraussichtlich aus langfaserverstärkten Thermoplasten im Spritzguss hergestellt werden.

Die Fertigungs- und Werkstoffkosten für endlos- oder langfaserverstärkte Kunststoffe sind hoch. Aus diesem Grund muss geprüft werden, ob der Griff aus einem kostengünstigen und nicht verstärktem thermoplastischen Werkstoff wie z.B. PA 66 hergestellt werden kann. Die Simulation in **Abb. 5-19** zeigt, dass sowohl der Griff als auch das Griffhaltestück Bereiche mit Spannungen oberhalb von 50 N/mm^2 aufweisen. Durch die überhöhte Verformungsdarstellung ist deutlich die hohe Zwangsverformung des Griffhaltestücks zu erkennen. Die maximale Vergleichsspannung beträgt 87 N/mm^2 .

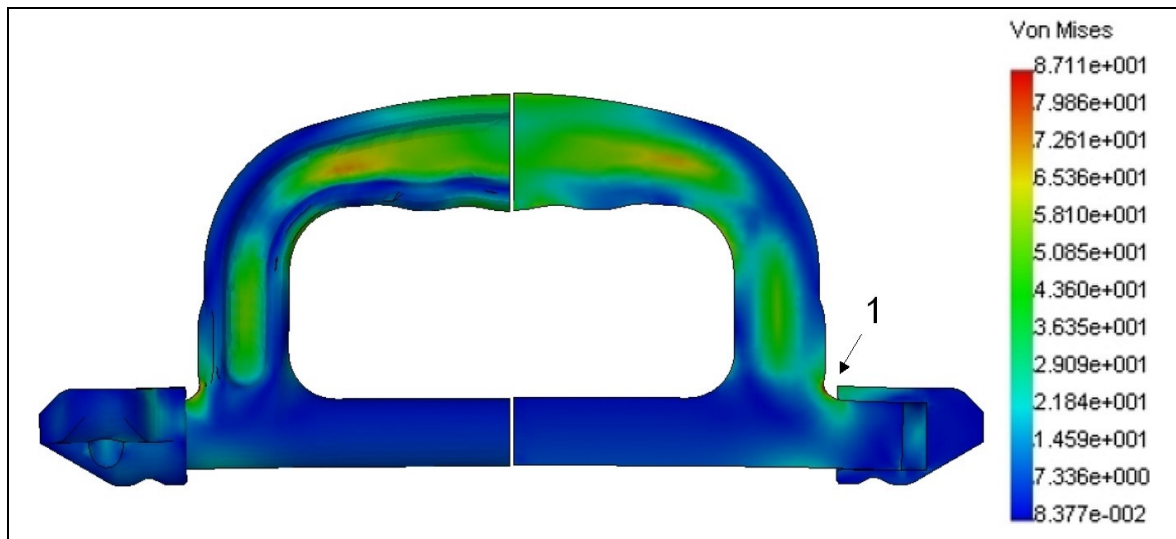


Abb. 5-19: FEM- Simulation des Griffs aus unverstärktem Kunststoff mit durchgehender Stange und des Griffhaltestücks; Darstellung der Von Mises- Vergleichsspannungen

Insgesamt kann die Verwendungsmöglichkeit eines kostengünstigen, thermoplastischen Griff- Werkstoffs wie PA 66 durch die Simulation für die gewählte Griffform nicht bestätigt, sondern nahezu ausgeschlossen werden, da PA 66 eine Zugfestigkeit von nur 82 N/mm^2 besitzt (vgl. Abb. 3-6). Nur durch eine deutliche Erhöhung des Materialeinsatzes könnte eine Lösung realisiert werden. Das ist aber in Bezug auf das höhere Gewicht und die zu erwartenden Artefakte nicht sinnvoll.

5.2.6 Armauflagen

Die Armauflagen des CCB werden so ausgelegt, dass das Liegenelement bei Belastung der Auflagen vor Überbeanspruchung geschützt wird (vgl. Kap. 4.2.1.3). Die Armauflageplatten werden daher definiert weich ausgeführt. Es sind zwei Varianten möglich, eine CFK- Variante und eine PC- Variante. Die Spannungen und Verformungen der CFK- Variante unter einer Streckenlast von 0,14 N/mm (100 N/700 mm) zeigt **Abb. 5-20**.

Die CFK- Auflageplatte mit einer Stärke von 5 mm besteht bis auf eine CFK- Gewebe- Decklage vollständig aus CFK- Gelege in Längsrichtung. Die Herstellung der Platte erfolgt mit Hilfe von gepressten Prepregs. Der E- Modul in Längsrichtung ist daher besonders hoch und erreicht bei einem Faservolumengehalt von ca. 50 % nach [RUG03, S 8.09] einen Wert von 90000 N/mm². Mit diesem Wert wird die Simulation durchgeführt.

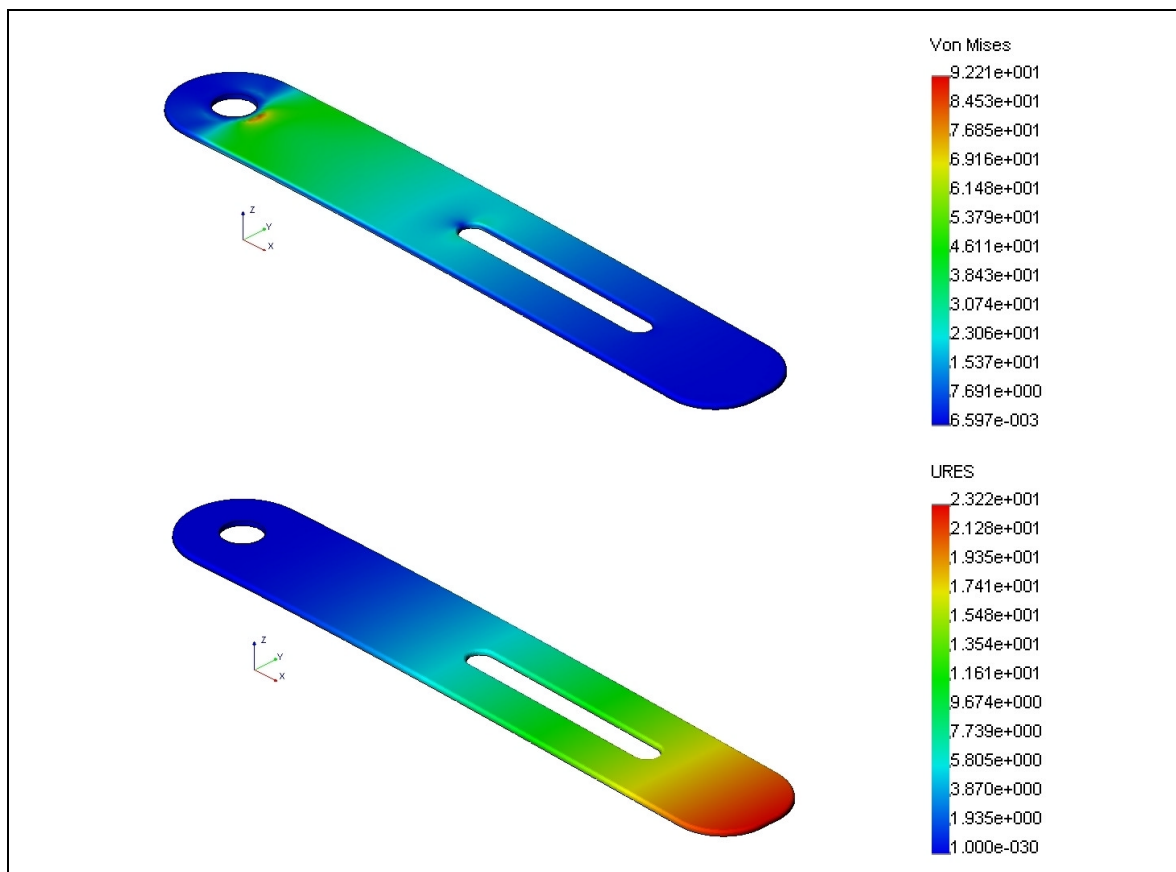


Abb. 5-20: FEM- Simulation der CFK- Armauflageplatte bei Belastung mit einer Streckenlast von 0,14 N/mm (100 N/700 mm) und fester Einspannung im Bereich der Bohrung; oben: Von Mises- Vergleichsspannungen, unten: Verschiebungen (EG = 5 mm, E=90000 N/mm²)

Die auftretenden Vergleichsspannungen sind mit 143 N/mm^2 unkritisch. Die Durchsenkung beträgt am Endpunkt ca. 23 mm. Bei Verwendung eines Werkstoffs mit einem E- Modul von 52000 N/mm^2 beträgt diese 40 mm. Dieser Wert wird auch von CFK- Geweben erreicht.

Bei einer Belastung der CFK- Auflageplatte mit 200 N am Endpunkt ergeben sich Spannungen von etwa 430 N/mm^2 in einem kleinen Bereich an der Einspannstelle und eine Durchsenkung am Endpunkt von ca. 146 mm, **Abb. 5-21**. Die nicht dargestellte maximale Dehnung liegt bei ca. 0,2 %.

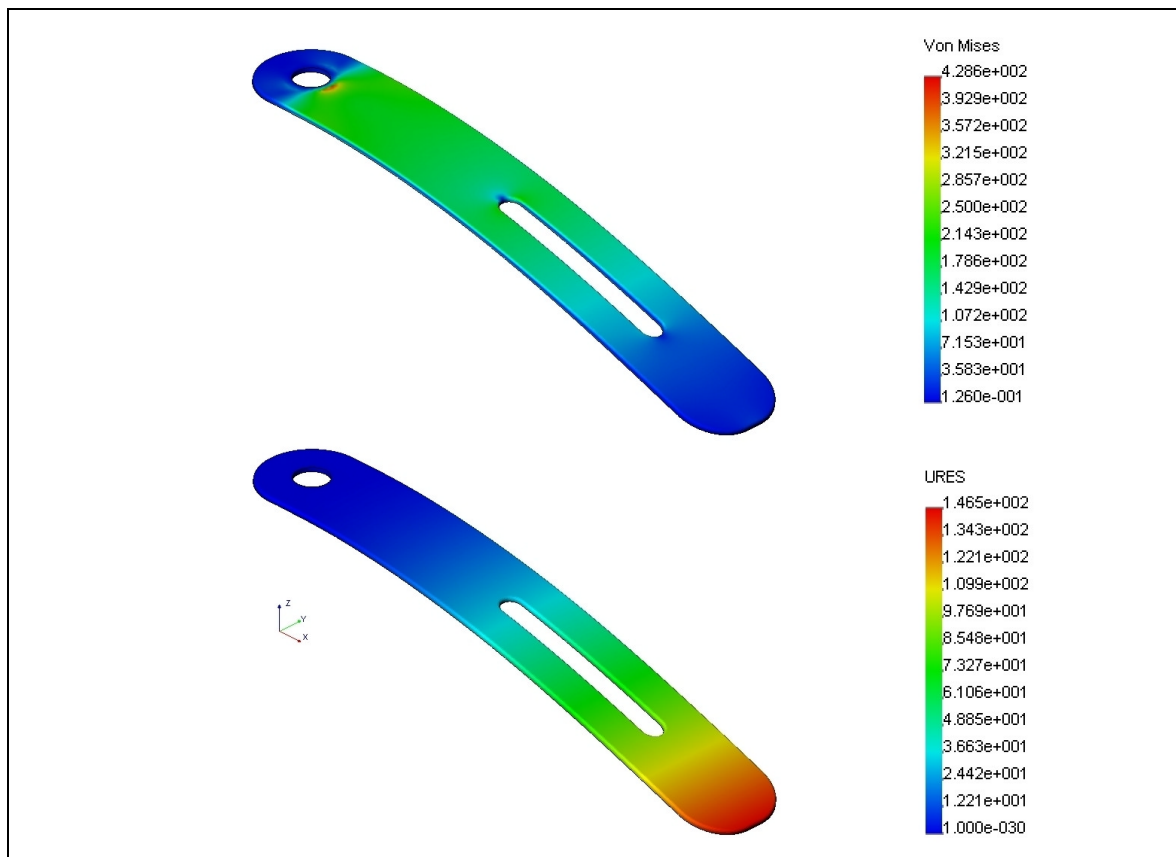


Abb. 5-21: FEM- Simulation der CFK- Armauflageplatte bei Belastung mit einer am Endpunkt aufgebrachten Last von 200 N und fester Einspannung im Bereich der Bohrung; oben: Von Mises- Vergleichsspannungen, unten: Verschiebungen (EG = 5 mm, E=90000 N/mm²)

Im Seitenbereich der Bohrung treten nur Biegespannungen von ca. 300 N/mm^2 auf. Bei großflächiger Einspannung kann also u. U. die Maximalspannung von 430 N/mm^2 auch geringer ausfallen. Nach [IDA88, S. 9] beträgt die Zugfestigkeit für ein CFK- UD- Laminat mit einem Faservolumengehalt von nur 35 % bereits 420 N/mm^2 . Es ist damit gezeigt, dass die CFK-Auflageplatte definiert weich ist und eine Punktlast von 200 N bei Verwendung von UD- Laminat tragen kann.

Die Auflageplatte aus PC weist durch die Profilierung eine ähnliche Steifigkeit wie die CFK- Platte auf. **Abb. 5-22** zeigt die Von Mises- Vergleichsspannungen und Verschiebungen bei Belastung mit einer Streckenlast von 0,14 N/mm.

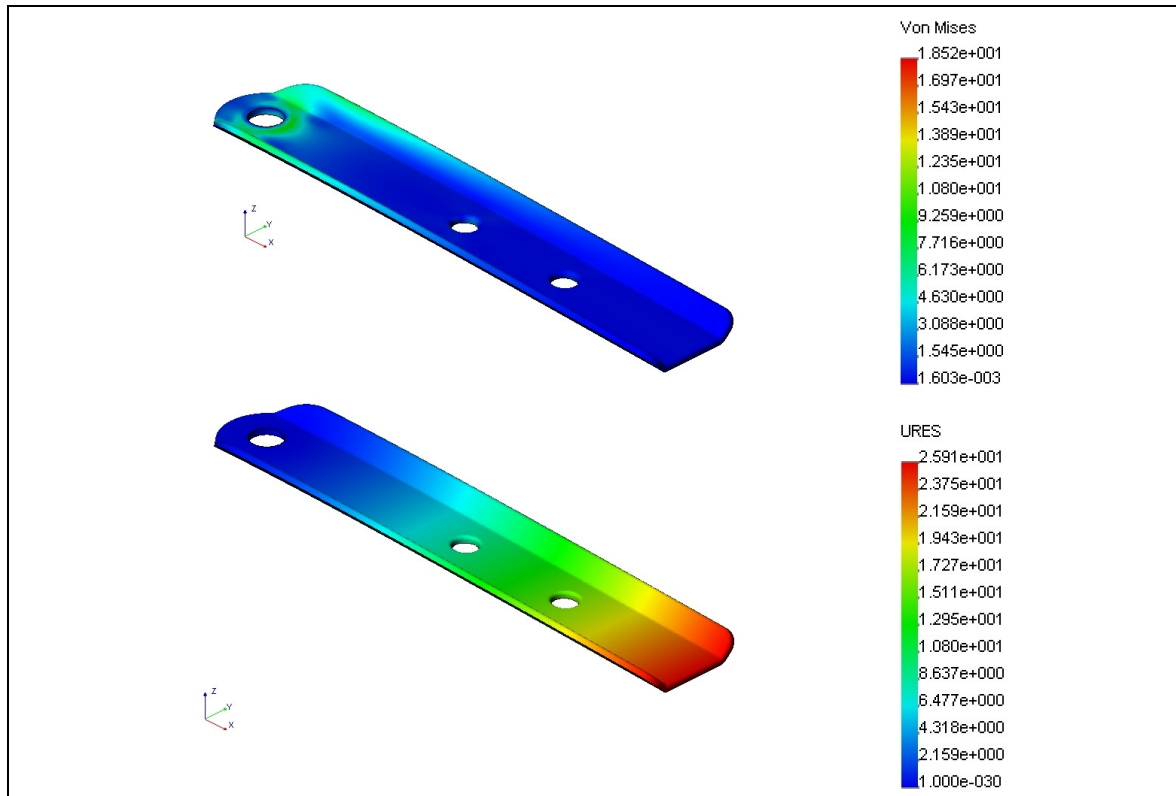


Abb. 5-22: FEM- Simulation der PC- Armauflageplatte bei Belastung mit einer Streckenlast von 0,14 N/mm (100 N/700 mm) und fester Einspannung im Bereich der Bohrung; oben: Von Mises- Vergleichsspannungen, unten: Verschiebungen (EG = 5 mm, E=2400 N/mm²)

Die auftretenden Von Mises- Vergleichsspannungen sind mit 19 N/mm² in einem sehr kleinen Bereich der festen Einspannung unkritisch. Die Durchsenkung beträgt am Endpunkt ca. 26 mm.

Für die Belastung mit 200 N am Endpunkt ergeben sich in einem sehr kleinen Bereich der festen Einspannung Von Mises- Vergleichsspannungen von 78 N/mm². In größeren Bereichen um die Einspannung herum liegt Sie bei ca. 50 N/mm². Die Verschiebungen erreichen Werte von 137 mm. Nach Abb. 3-6 (S. 60) liegen die ermittelten Vergleichsspannungswerte bereits im Bereich der Zugfestigkeitsgrenze von PC. Die Auflageplatte würde sich daher zwar plastisch verformen, es könnte aber aufgrund des zähes Verhaltens des Werkstoffs kein Bruch durch die Biegebelastung eintreten. Die hohen Belastungen können daher akzeptiert werden und es ist keine Modifizierung der Form notwendig.

6 Fertigungskonzepte

Die Fertigungsverfahren (vgl. Kap. 3.4) hängen entscheidend von den zu erwartenden Stückzahlen ab. Es müssen daher Konzepte zur Prototypenherstellung und Serienfertigung entwickelt werden. Für die Erprobungsphase im Bereich des Prototypenstadiums wurden zwei Prototypvarianten gefertigt, wobei lohnintensive Fertigungsverfahren zum Einsatz kamen. Für die Serienfertigung muss bei hohen Stückzahlen ein möglichst hoher Automatisierungsgrad mit geringer Nacharbeit gewährleistet sein. Die Investitionskosten können dann auf die Stückzahl umgelegt werden und es ist ein hoher Teiledurchsatz gewährleistet.

6.1 Prototypenfertigung

Die Fertigung der Funktionsprototypen erfolgt für beide Varianten im Handlaminierverfahren (vgl. Kap. 3.4.1). Dieses ist am weitesten verbreitet, gewährleistet eine gute Qualität und benötigt nur sehr geringe Investitionskosten. Der Nachteil des Verfahrens ist die Lohnintensivität.

6.1.1 CCB1

Das CCB1 besteht aus einem Mittelteil und zwei einschiebbaren Kopfteilen. Das Mittelteil des CCB1 wird aus 4 Elementen zusammengefügt, die mit Hilfe von zwei Negativformen und einer Positivform erstellt werden, Abb. 6-1. Das gewährleistet die hohe Oberflächengüte auf der Außenseite und innerhalb der Kopfteileinschübe. Nach der Erstellung der Elemente werden die einteiligen Hüllen der Kopfteileinschübe mit der Ober- und Unterseite verklebt. Darauf erfolgt das Ausschäumen der Hohlräume und schließlich das Verbinden der Ober- und Unterseite durch Aufbringen von weiteren Gewebebändern auf der Außenseite.

Für diese Lagen muss bereits bei der Abformung entsprechend Platz in der Negativform berücksichtigt werden, so dass diese später nicht überstehen. In anschließender Nacharbeit wird der Verbindungsbereich zu allen Flächen angeschliffen und es werden die Öffnungen und Bohrungen auf der Unterseite gefräst. Den letzten Arbeitsschritt stellt schließlich das Lackieren dar.

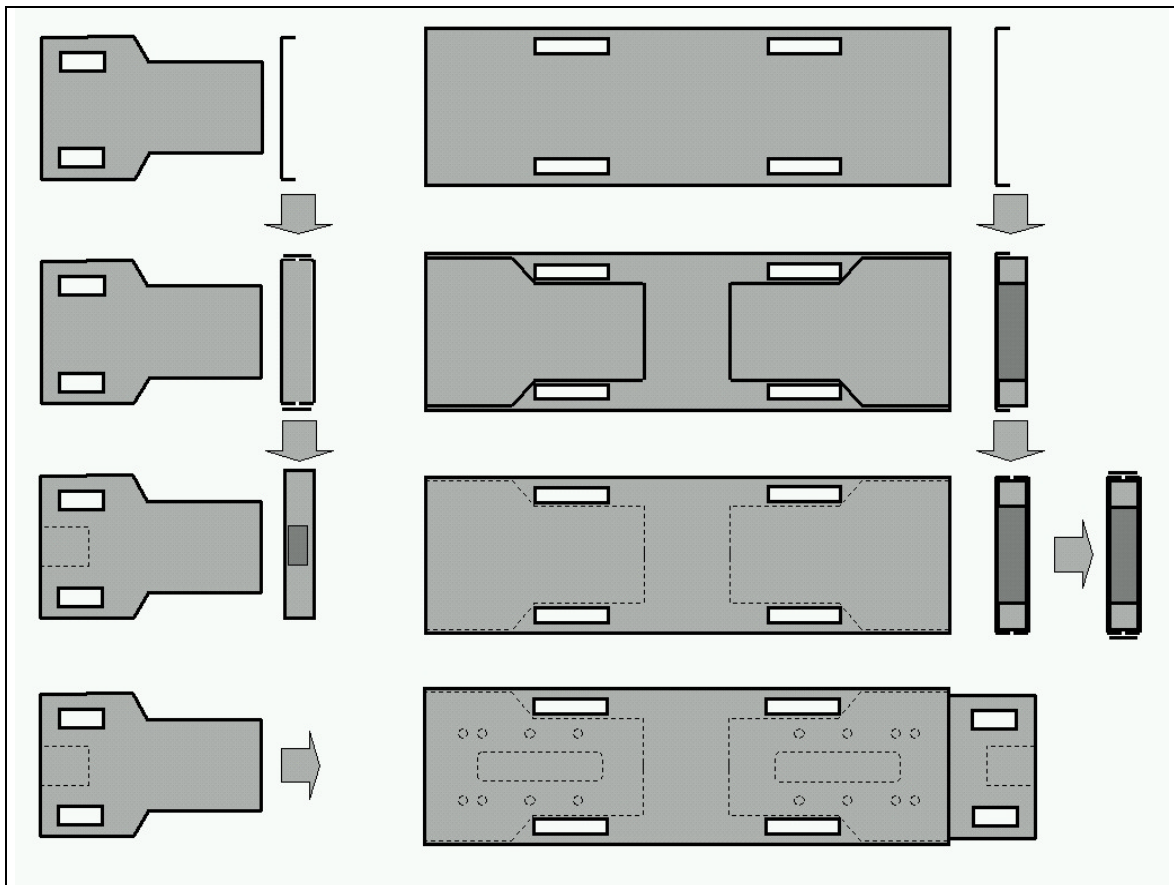


Abb. 6-1: Fertigungsschritte des Prototyps CCB1 mit Kopf- und Mittelteil

Fertigung der Kopfteile

Für das Kopf- bzw. Fußteil werden zunächst zwei Halbschalen erstellt. Einige Stationen dieses Herstellungsprozesses zeigt **Abb. 6-2**. Die Negativ- Formhälften werden auf einer CNC- Fräse gefräst und anschließend für die Abformung überarbeitet. In die vorlackierten Formhälften wird das Laminat eingebracht und mit Hilfe von Vakuumtechnik verdichtet.

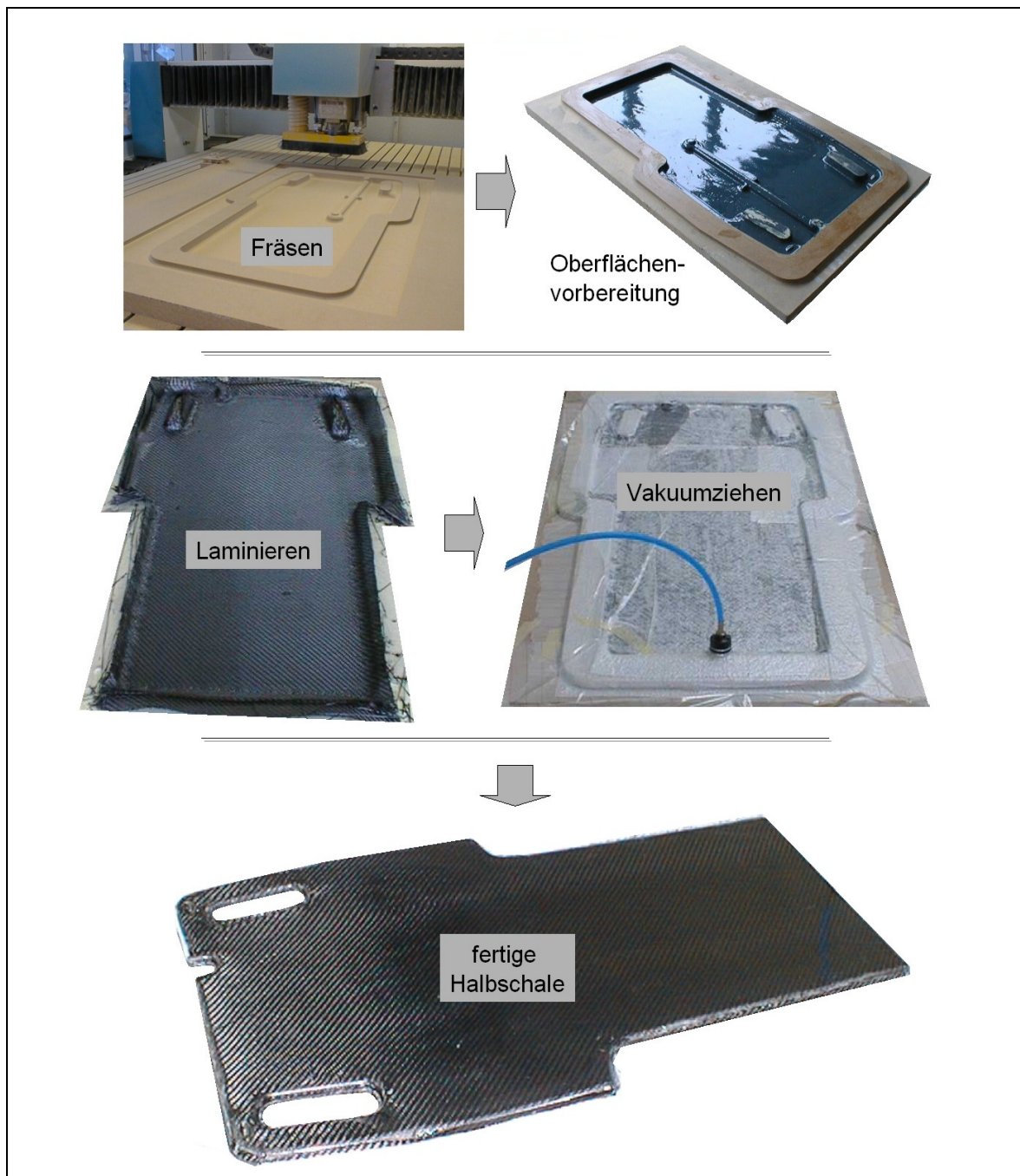


Abb. 6-2: Stationen des Herstellungsprozesses der Kopfteile; oben: Fertigung der unteren Formhälfte, mittig und unten: Fertigung der Oberschale

Die beiden Halbschalen werden schließlich auf der Außenseite im Seitenbereich verbunden und ausgeschäumt. Nach dem Nacharbeiten der Seitenbereiche erfolgt die Lackierung. Der Einschub für das CT- Kopfteil wird gefräst und in das Kopfteil eingepasst. Der Stellhebel für die Arretierung wird aus zwei Formhälften in einem Arbeitsgang aus mit Matrix imprägnierten CFK- Rovings hergestellt und ist bis auf die Entfernung des Formgrates nacharbeitsfrei.

Aufbau und Fertigung der Mittelteilhalbschalen

Jede Halbschale wird nach Abb. 6-3 aufgebaut. Das Laminat wird in 4 Schichten gefertigt, die jeweils im Vakuumverfahren mit einem Unterdruck bis 0,9 bar unter Verwendung von Abreißgewebe und Saugvlies ausgehärtet werden. Der Aufbau in vier Schritten ergibt sich aus der Forderung nach einem möglichst leichten Laminat mit hohem Faservolumengehalt. Die Schichten 1 und 2 können nicht in einem Arbeitsgang erstellt werden, da die Matrix bei Anlegen des Vakuums aus dem Fasergewebe heraus- und in den Wabenkern hineingepresst werden würde. Durch dieses aufwändige Vorgehen wurden rechnerisch Faservolumengehalte über 50% erreicht.

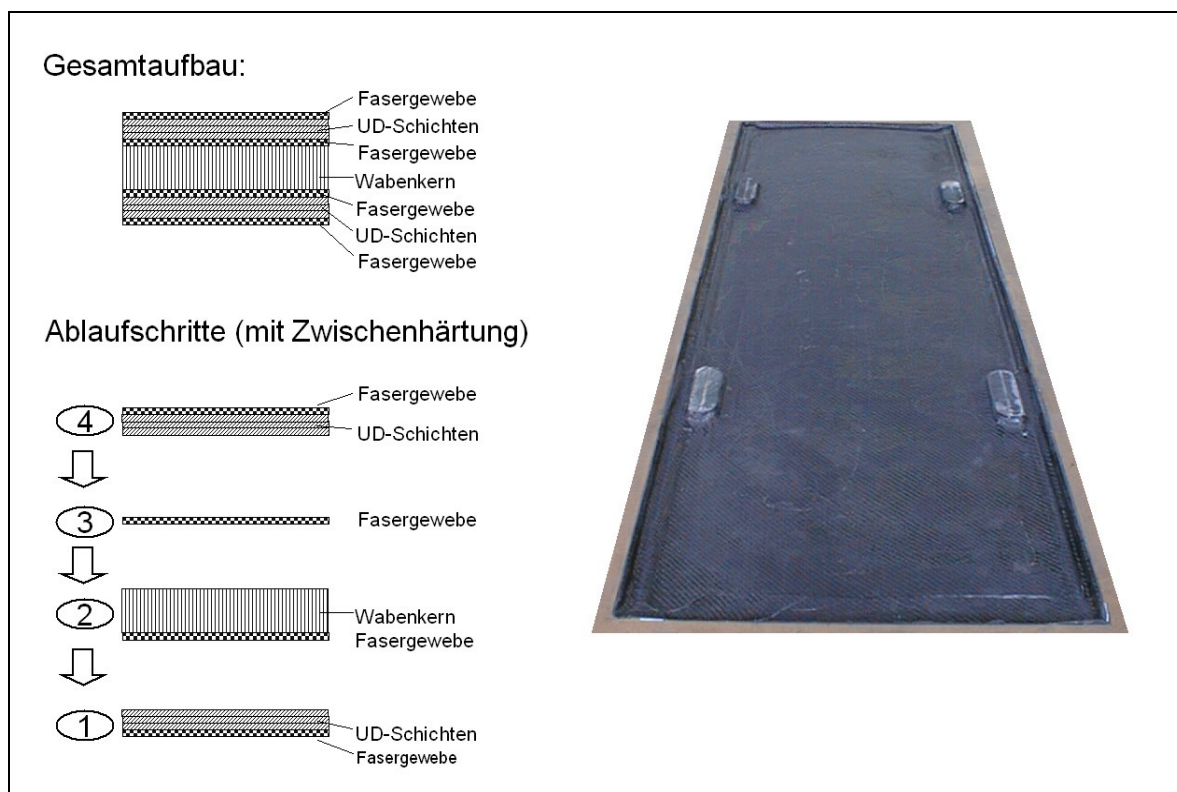


Abb. 6-3: Fertigungsschritte einer Halbschale des Mittelteils

Ein weiterer Grund für den Schichtaufbau ist die Einstellmöglichkeit des Unterdrucks speziell für das Laminieren des Wabenkerns. Dieser ist zwar bis 5 bar (Aushärtung im Autoklav, vgl. Kap. 3.4.1 S. 67) druckstabil, ein zu hoher Druck presst das Laminat aber in die einzelnen Waben hinein, wodurch u. a. Delaminationen entstehen können. An den Kanten von Durchbrüchen (Reinigungsöffnung)

wird der Wabenkern durch thixotrope¹² Matrix ersetzt. Dadurch ist ein späterer Fräsprozess in diesem Bereich möglich. Im Bereich von Verbindungskanten wird der Wabenkern durch massives Laminat ersetzt.

Insgesamt ist der Aufwand zu groß, der bei Verwendung von Wabenkernen notwendig ist. Es ist daher ein geschlossenzelliger Schaumwerkstoff als Kern vorzuziehen, der mit dem Laminat in einem Arbeitsgang zu einem Sandwichbauteil verarbeitet werden kann. Weiterhin lässt sich eine optimale Oberfläche durch das Schließen der Kontur auf der Außenseite nur mit aufwändiger Hand-Nacharbeit gewährleisten. Die Form des CCB1 muss daher bei Beibehaltung eines dreiteiligen Konzeptes für die Serienfertigung vereinfacht und andere Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen.

6.1.2 CCB2

Das einteilige Liegenelement des CCB2 wird ohne Sandwichstruktur in Schalenbauweise aus drei Elementen aufgebaut, die mit dem Handlaminierverfahren hergestellt werden, **Abb. 6-4**.



Abb. 6-4: Stationen der Liegenelement- Fertigung des CCB2

¹² Thixotropieren: Gelartiges Eindicken durch Zugabe von Additiven, z.B. amorphe Kieselsäure

Die beiden Halbschalen werden über ein innenliegendes Adapterelement verbunden. Die Ausschäumung mit PUR- Hartschaum erfolgt nach dem Fügen. Die äußere Oberfläche des Liegenelementes ist top coat- beschichtet.

Der Griff wird über zwei Formhälften und einen Innenkern jeweils in einem Arbeitgang aus getränkten CFK- Rovings, thixotroper Matrix und einer Decklage Gewebe erstellt und anschließend von Grat befreit und auf Endlänge bearbeitet, **Abb. 6-5**. Eine Farbgebung durch eine zusätzliche Lackierung erfolgt nicht.

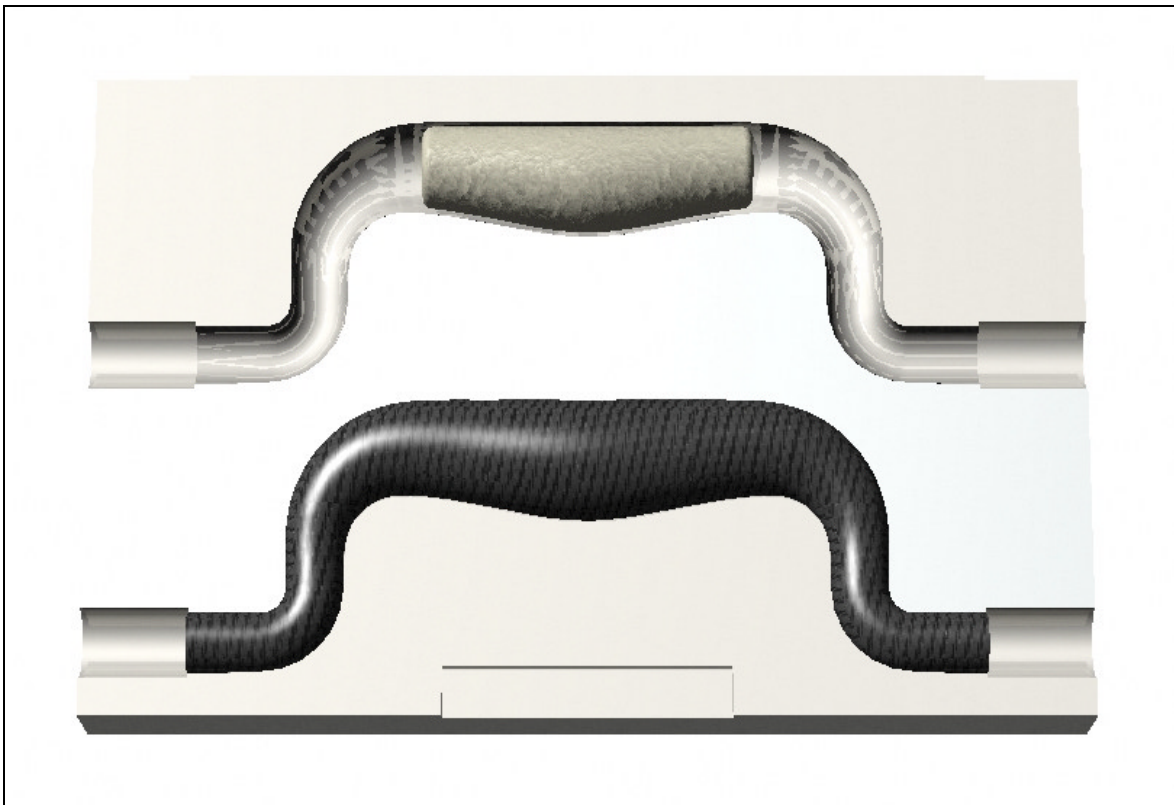


Abb. 6-5: Griffherstellung; oben: innerer Schaumkern, unten: fertiger Griff

Die Griffagerbuchs werden zusammen mit den Griffen in die entsprechenden Vertiefungen des Liegenelementes (vgl. Abb. 4-22) eingesetzt und vergossen, wodurch eine optimale Krafteinleitung in das Liegenelement gewährleistet wird.

Das Ausschäumen des fertigen Liegenelementes über eine Öffnung im Bereich der Kopfteilaufnahme ist insbesondere bei geringer Reaktionszeit des Schaumsystems kritisch. Ergeben sich Fehlstellen, können diese nur nach dem Fügen durch Röntgenprüfung festgestellt werden. Eine Beseitigung dieses Fehlers ist nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Nahezu ausgeschlossen wird das Auftreten dieses Fehlers dadurch, dass etwa 50% mehr Schaumwerkstoff

eingesetzt wird, als es für eine freie Schäumung notwendig wäre. Der Expansionsvorgang und die Aushärtung erfolgen dann unter höherem Druck und die Form wird vollständig gefüllt. Das Gewicht des Schaumkernes steigt dadurch aber um ca. 50% oder 6 N gegenüber dem minimal möglichen auf 18 N an. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass punktuell Stellen mit höherer Dichte auftreten können.

6.1.3 CCB3

Das Liegenelement des CCB3 ist dem des CCB2 sehr ähnlich. Für die Fertigung wurden Formhälften sowohl für die Außenkontur als auch den Presskern verwendet. Dadurch konnte auf ein Verbindungselement zwischen Ober- und Unterseite verzichtet werden bzw. es konnte eine integrale Bauweise des Sandwichaufbaus erreicht werden. Der Stützkern dient gleichzeitig als Presskern und ermöglicht die Verbindung der Formhälften direkt während des Laminiervorganges. Fehlstellen, die durch die Gewebesteifigkeiten an kleinen Radien entstehen könnten, werden dadurch vermieden. Da der verwendete Schaumkernwerkstoff nur eine Druckstabilität von ca. 0,2 N/mm² (entspricht 2 bar) besitzt, kann dieser bei Verdichtung im Autoklaven oder in einer hydraulischen Presse punktuell nachgeben. Dies ist wichtig, da durch händisches Einlegen des Faserwerkstoffs geringe Dickenunterschiede des Laminats möglich sind. Das Liegenelement wurde nach dem Laminiervorgang mit einem zwei-komponentigen Acrylatlack beschichtet.

Da die Kernherstellung vollflächig von der Aufstandsfläche der Negativform erfolgt, ist die Realisierung einer geringer Schaumdichte möglich, die aber über der freien Schäumung liegt. Gleichzeitig ist eine sehr gute Homogenität gewährleistet. Eine Fehlererkennung im Randbereich ist nach dem Aushärten problemlos durch Sichtprüfung gegeben. Damit können fehlerbehaftete Stützkerne vor dem Fügen mit dem Decklaminat aussortiert werden.

Die Fertigung der Griffe erfolgt analog zum CCB2, allerdings in massiver Bauweise ohne Innenkern. Die massive Bauweise bietet die Voraussetzung für die Anwendung eines Spritzguss- Verfahrens bzw. des RTM- Verfahrens.

Die Griffe des CCB3 wurden im Handlaminierverfahren aus getränkten Rovings hergestellt, **Abb. 6-6**.

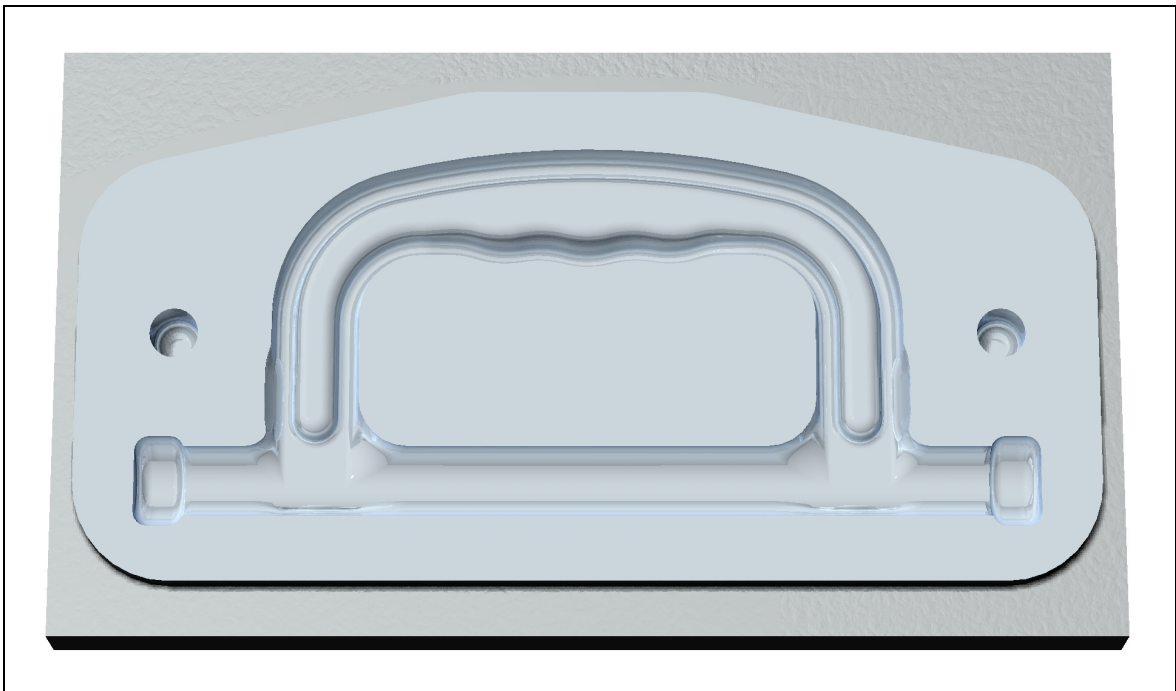


Abb. 6-6: Formwerkzeug der Griffe des CCB3

Die Griffe sind in Griffhaltestücken gelagert, die mit dem Liegenelement verschraubt sind (vgl. Abb. 5-14). Daher wird das Liegenelement an den entsprechenden Punkten mit Durchgangsbohrungen versehen. Die Zentrierungen für diese Bohrungen sind bereits in der Form des Liegenelementes enthalten, wodurch ein aufwändiges Ausmessen und Anreißen der Position der Bohrungen entfallen kann.

6.2 Serienfertigung

Für die Serienfertigung müssen Fertigungsverfahren angewendet werden, die geringe Fertigungskosten mit hohem Teileausstoß in reproduzierbarer Qualität gewährleisten. Die Auswahl des Fertigungsverfahrens und der Grad der Automatisierung hängen dabei entscheidend von den Stückzahlen ab.

6.2.1 Liegenelemente

Für kleine bis mittlere Stückzahlen ist das Harzinjektionsverfahren (vgl. Kap. 3.4) sehr gut geeignet, da es gegenüber dem Handlaminieren besser reproduzierbare und höhere Qualität bei erhöhtem Teileausstoß gewährleistet. Es werden endlosfaserverstärkte, duromere Kunststoffe verwendet. Die Anlagenkosten erhöhen sich gegenüber dem Handlaminieren durch die Verwendung von Vakuumtechnik, die Zuführung und Dosierung der Harzkomponente unter Druck, den Gebrauch von druckfesten und beheizbaren Formen z.B. aus Aluminium und den Einsatz weiterer Werkzeuge für die Erstellung von Faser- Vorformlingen oder Presskernen. Geringe Kostensenkungen können gegenüber dem Handlaminieren dadurch erreicht werden, dass Verbrauchsmaterialien wie Saugfliese oder Abreißgewebe nicht benötigt werden. Das RTM- Verfahren kann bis zur Druckfestigkeit des Schaumkernwerkstoffs für eine integrale und darüber für eine differenziale Bauweise genutzt werden. Die Taktzeiten liegen bei Verwendung beheizter Werkzeuge deutlich unter einer Stunde. Damit ergibt sich eine mögliche Jahresproduktion von deutlich über 1000 Stück im Einschichtbetrieb je RTM-Form.

Für eine integrale Bauweise wird für die Kopfteile des CCB1 bzw. die einteiligen Liegenelemente des CCB2 oder CCB3 zunächst ein Stützkern in einem einfachen Formwerkzeug im RIM- Verfahren geschäumt. Anschließend wird in die untere Hälfte des RTM- Formwerkzeuges das trockene Verstärkungshalbzeug mit seitlichem Überstand eingelegt und darauf der Presskern eingesetzt. Die überstehenden Ränder des Faserwerkstoffs werden auf der Oberseite fixiert, was z.B. durch thermoplastische Binder erreicht wird. Dadurch ist die Verbindung der beiden Hälften in einem Arbeitsgang gewährleistet. Parallel dazu erfolgt die Belegung der oberen Hälfte des RTM- Formwerkzeuges mit Faserhalbzeug. Nach dem Schließen des Formwerkzeuges wird dieses evakuiert und das Harz im Niederdruckverfahren injiziert. Der niedrige Druck ist notwendig, da der Presskern nur eine begrenzte Druckstabilität von 2 bar aufweist und die Gefahr der Faserauswaschung während des Injizierens besteht. Eine Erhöhung der Wertschöpfung der kostenintensiven RTM- Form kann dadurch erreicht werden, dass der mit Fasern belegte Vorformling in einem separatem Werkzeug erstellt wird und die RTM- Form zur Beschleunigung der Aushärtungsphase temperiert

wird. Die Qualität der RTM- Form bestimmt dabei die Qualität des fertigen Bauteils. Im Idealfall muss nach der Aushärtung nur der Formgrat vom Werkstück entfernt werden. Die Farbgebung kann durch Einfärben der Harzkomponente, Vorlackierung der RTM- Form mit Top Coat oder durch spätere Lackierung außerhalb der Form erfolgen.

Für das Mittelteil des CCB1 werden zunächst die Innentaschen für die Kopfteile auf zwei Positivkernen gefertigt. Anschließend werden diese in einem RIM- Werkzeug umschäumt. Nach der Aushärtung wird der entstandene Kern zusammen mit den Positivkernen der RIM- Form entnommen und in die bereits mit Verstärkungsfasern belegte untere Formhälfte des RTM- Werkzeuges eingelegt. Die weiteren Schritte erfolgen analog zur Erstellung des Kopfteils.

Auch die Differenzialbauweise ist unter Verwendung des RTM- Verfahrens für alle Elemente möglich. Hierfür werden die einzelnen Schalenelemente und der Stützkern in geschlossenen Formwerkzeugen mit hohem Druck einzeln gefertigt und anschließend miteinander verbunden. Das Verfahren ist technisch wesentlich aufwändiger, da wie bei der Einzelfertigung ein zusätzliches Verbindungsteil benötigt wird, um die Formhälften des Mittelteils bzw. des Kopfteils zu verbinden. Weiterhin ist eine höhere Anzahl an Formwerkzeugen und eine hydraulische Presse notwendig. Die Qualität ist höher als bei einer integralen Bauweise unter Verwendung des RTM- Niederdruckverfahrens. Für den konkreten Anwendungsfall ist bei mittleren Stückzahlen insgesamt eine integrale Bauweise zu bevorzugen.

Für mittlere bis große Stückzahlen ist bei Verwendung von Duromeren als Matrix der Einsatz von Prepreg- Halbzeugen sinnvoll. Es ist dabei nur eine Differenzialbauweise möglich, da das Pressen der Prepregs unter hohem Druck erfolgen muss. Die Prepregs können als Bänder automatisiert zugeführt und abgelegt werden, wobei unterschiedliche Wandstärken aufgebaut werden können. Der Teileausstoß ist wesentlich größer als beim RTM- Verfahren, da die Taktzeit nur wenige Minuten beträgt.

Kann die Verwendung einer höheren Wandstärke akzeptiert werden, so ist für große Stückzahlen und einer duromeren Matrix auch das SMC-C Verfahren oder AdvancedSMC-Verfahren [STA03] (vgl. Kap. 3.4.2) einsetzbar. Die Qualität ist

aber im Vergleich zum RTM- Verfahren unter Verwendung von Endlosfasern geringer und das Endgewicht höher.

Bei Verwendung einer thermoplastischen Matrix können für große Stückzahlen faserverstärkte Organobleche im Taktpressverfahren verarbeitet werden. Hohe Umformgrade sind bei Endlosfaserverstärkung nicht möglich. Die Verwendung von kurzen Fasern erlaubt dagegen zwar höhere Umformgrade, führt aber zu begrenzten Festigkeitseigenschaften. Eine Lösung dieses Problems besteht analog der Verwendung von *Tailored Blanks*¹³ im Automobilbau für Organobleche dadurch, dass unterschiedliche Plattenhalbzeuge entsprechend der notwendigen Geometrie vor dem Umformvorgang im Taktpressverfahren zu einer Platte zusammengeschweißt werden. Der Mittelbereich des Liegenelementes, der nur einen geringen Umformgrad aufweist, enthält dann den für die Biegesteifigkeit und -festigkeit notwendigen Endlosfaserstrang, während die stark umgeformten Seitenbereiche keine oder nur Kurzfaserverstärkung aufweisen. Die Position der Schweißverbindung kann konturnah an den Randbereich gelegt werden, so dass beim konventionellen Röntgen keine Artefakte durch diese Verbindungen entstehen. Der Zuschnitt für das faserverstärkte Innenteil kann mit geringem Verschnitt aus einem Plattenhalbzeug ausgeführt werden. Der Zuschnitt für den unverstärkten Seitenbereich kann entweder als einteiliger Rahmen oder aus einzelnen Rahmenelementen, die wiederum verschweißt werden, aus einer Platte erfolgen. Die Verwendung des einteiligen Rahmens führt zu sehr hohem, aber sortenreinen Verschnitt, der direkt rezykliert werden kann. Das umformfertige Halbzeug weist außerdem sehr wenig Schweißnähte auf. Die Verwendung von einzelnen Rahmenelementen führt demgegenüber zu sehr vielen Schweißnähten aber zu wenig Verschnitt. Da der Werkstoffpreis für unverstärktes Material gering ausfällt, eine direkte Rückführung des Verschnitts in den Werkstoffkreislauf erfolgen kann und jede zusätzliche Schweißnaht bzw. jeder Zuschnitt Kosten verursacht, ist der einteilige Rahmen zu bevorzugen. Die Verbindung der beiden Formhälften kann ohne Verbindungselement durch Stumpfschweißen erreicht werden. Das Ausschäumen erfolgt schließlich nach dem Schweißvorgang.

¹³ Tailored Blank: Aus Dünnblechteilen unterschiedlicher Stärke, Güte oder Zusammensetzung mit Hilfe von Lasertechnik zusammengeschweißtes Blech

Eine weitere Lösung für große Stückzahlen bei Verwendung von thermoplastischem Plattenmaterial besteht darin, ein Faserhalbzeug mit bestimmter Länge wiederkehrend direkt in das unverstärkte, endlose Halbzeug in einer Walzenstrecke einzuarbeiten und im Anschluss daran auf exakte Länge abzulängen. Der Vorteil besteht darin, dass das Zusammenschweißen von einzelnen Halbzeugen entfällt. Aufwändig ist allerdings die exakte Zuführung und Konsolidierung des zugeschnittenen Faserhalbzeuges mit konstanten Abständen in das thermoplastische Plattenmaterial und die nachgelagerte Ablängung. Wird das Faserhalbzeug bereits durch den Webprozess entsprechend konfektioniert, entfällt die Notwendigkeit der exakten Zuführung und es verbleibt für das thermoplastische Halbzeug nur die exakte Ablängung. Diese Lösung kann auch einen Herstellungsprozess mit duromeren AdvancedSMC ermöglichen, die nicht auf Länge geschnitten, sondern aufgerollt werden. Eine zusätzliche Möglichkeit besteht bei Verwendung von thermoplastischem Plattenmaterial dadurch, dass ein unverstärktes Halbzeug zunächst im Taktpressverfahren umgeformt wird. Anschließend wird auf die Innenseite ein endlosfaserverstärktes Organoblech geschweißt, um die Zug- und Druckkräfte aufzunehmen.

Neueste Entwicklungen zielen auf die Anwendung der RTM- Technik mit thermoplastischer Matrix. Dafür werden die niedrigviskosen Präpolymere des thermoplastischen Werkstoffs in die Form injiziert, die Vernetzungsreaktion findet dann innerhalb der Form zwischen den Fasern statt [ALC03]. Mit diesem Verfahren kann auch für mittlere Serien thermoplastische Matrix zur Anwendung kommen.

Die Großserienfertigung von Wirbelsäulenbrettern erfolgt in der Regel unter Verwendung einer thermoplastischen Matrix im Taktpressen oder Rotationsgießen. Beiden Verfahren gemeinsam ist die in einem zweiten Schritt erfolgende Ausschäumung des Innenbereichs. Die einfachste Fertigungsmethode auch für mittlere Serien liegt daher in der Anwendung von Integralschäumen in einem RIM- Prozess (z.B. Baydur60®). Damit kann ein komplex geformtes Bauteil in einem Arbeitsgang hergestellt werden. Die Außenwandstärke ist über die chemische Reaktion oder die Temperatur einstellbar. Die geringen Festigkeiten der bei diesen drei Verfahren verwendeten Werkstoffe führen aber zu hohen

Wandstärken bzw. insbesondere beim Integralschäumen zu hohem Gewicht. Diese Verfahren sind daher für das Liegenelement des CCB ungeeignet.

6.2.2 Haltegriffe

Die Haltegriffe des CCB2 sind nur im Griffbereich zur Gewichtsersparnis hohl ausgeführt. Diese Variante ist fertigungstechnisch sehr aufwändig, da ein zusätzlicher Schaumkern verwendet werden muss. Dieser weist innerhalb der Form keinen Kontakt zum Rand auf und kann daher nicht exakt positioniert werden. Nur mit einem dreiteiligen Formwerkzeug, das aus zwei Formhälften und einem Kernelement besteht, kann der Griffbereich hohl gestaltet werden. Der hohle Bereich muss mindestens zu einer Seite eine Öffnung aufweisen, da der Kern im Formwerkzeug fixiert werden muss. Diese Griffvariante ist für ein Serienfertigungsverfahren aufgrund des hohen Aufwandes nicht gut geeignet. Es wird daher für die Serienfertigung nur der massive Griff des CCB3 betrachtet, der mit einem zweiteiligen Formwerkzeug hergestellt werden kann.

Für kleine bis mittlere Stückzahlen ist das RTM- Verfahren besonders geeignet, um eine reproduzierbare hohe Qualität zu erreichen. Der notwendige Faserstrang wird vorkonfektioniert und in die zweiteilige Form eingelegt. Nach dem Schließen und evakuieren der Form kann die Matrix mit hohem Druck injiziert werden, da kein druckbegrenzender Schaumkern vorhanden ist.

Als Serienfertigungsverfahren im Bereich großer Stückzahlen ist das Spritzgießen mit langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) gut geeignet, wobei Kohlenstofffasern zur Verstärkung verwendet werden müssen. Die Reproduzierbarkeit und Qualität sind sehr groß. Die Festigkeit ist im Vergleich zur Endlosfaserverstärkung geringer, deren Schwankungsbreite ist aber auch kleiner. Als Matrix kann PA 66 verwendet werden. PA 66 ist kältefest, stoßbelastbar, schlagzäh und abriebfest. Die chemischen Eigenschaften gewährleisten den Einsatz in der Medizintechnik, denn es ist u. a. beständig gegen Kohlenwasserstoffe, Benzin, mineralische Schmierstoffe sowie schwache Laugen [RIW40]. Es kann z. B. das Langfasergranulat Celstran PA66-CF20-03 (Ticona) im Spritzguss verarbeitet werden [CAM03].

7 Prüfung

Der klinische Einsatz von Prototypen soll die Leistungsfähigkeit des Konzeptes überprüfen und Schwachstellen aufzeigen, die bei der Realisierung im Rahmen einer Serienfertigung vermieden werden sollen.

Die Belastungsprüfung der Prototypen soll die geforderte Tragfähigkeit, auch im Dauerversuch, nachweisen. Die Ergebnisse dieser Versuche sind aus zeitlichen Gründen nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit.

7.1 Klinische Prüfung

Klinische Verwendung

Die Prototypen CCB1 und CCB2 wurden im Klinikum Essen praktisch getestet. Der Haupteinsatzort war der unfallchirurgische Bereich. Den Beginn der Prozesskette für die Benutzung stellte der Schockraum dar. Das jeweils zu testende CCB befand sich dafür auf dem Schockraumtisch. Immobiler Notfallpatienten wurden von der Krankentrage des Krankenwagens auf das CCB umgelagert und verblieben auf diesem während der Behandlungs- und Diagnosekette. Der Ablauf der Prozesskette gliedert sich in folgende Punkte:

- Auflagerung des CCB mit einer Armauflage auf den Schockraumtisch
- Umlagerung des Patienten von der Krankentrage auf das CCB
- Montage der zweiten Armauflage
- Versorgung und Diagnose des Patienten, z.B. durch Zugänge und Röntgen
- Montage der Gurte und evtl. des Tischaufsatzes
- Seitliches Anlegen der Arme und Schließen der Gurte

- Demontage beider Armauflagen, Positionierung der Geräte
- Transport des Patienten auf dem CCB zum CT, Scan- Vorgang
- Umlagerung des Patienten auf dem CCB und Transport zum OP

Ein weiteres Einsatzgebiet war der innerklinische Transport von Patienten von der Intensivstation zur CT-Diagnose und zurück.

Ergonomie

Im CT erfolgt die Umlagerung auf die Liegefläche des Gerätes, **Abb. 7-1**.

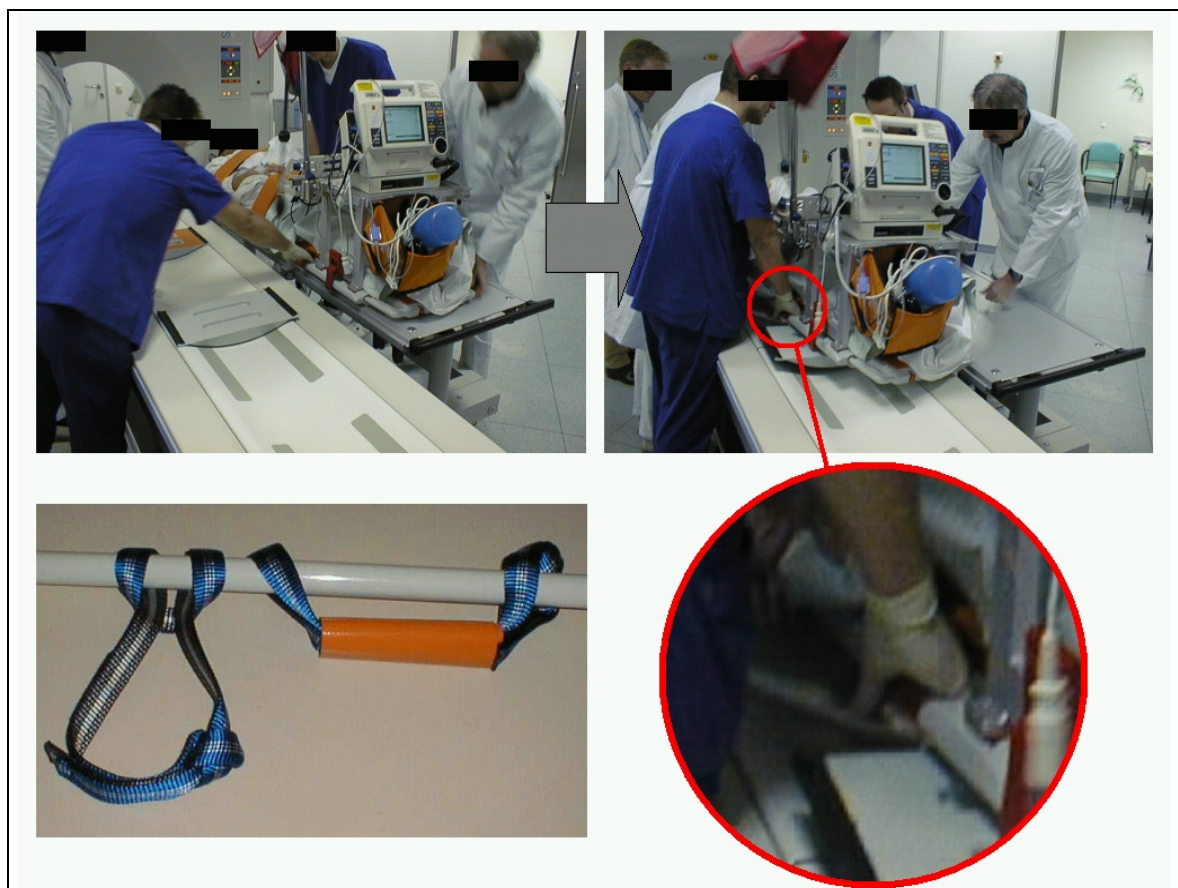


Abb. 7-1: Umlagerungsvorgang des CCB1 im CT und verwendete Griffschlaufen

Der Umlagerungsvorgang wird wie bisher durch Herüberziehen in Querrichtung durchgeführt. Die zu überbrückende Entfernung erzwingt dabei noch immer eine gebeugte Haltung des Personals. Da die CT-Liege konkav gestaltet ist, bestand während des Absetzens des CCB1 die Gefahr, dass die Finger eingeklemmt werden. Aus diesem Grund wurden Gurtschlaufen zur Verlängerung bzw.

Erhöhung der Handposition eingesetzt und bei CCB2 und CCB3 drehbare Bügelgriffe verwendet. Dadurch wurde diese Gefahr beseitigt. Der Umlagerungsvorgang ist im Gegensatz zur Verwendung eines Lakens nun auch mit einer Hand je beteiligter Person möglich. Dadurch kann eine Abstützung des Oberkörpers mit der freien Hand erfolgen und die körperliche Belastung reduziert werden.

Reinigung, Lebensdauer und Verschleiß

Die tägliche Benutzung des CCB2 über etwa 6 Monate mit über 150 Einsätzen zeigte, dass die Oberfläche des Liegenelementes insbesondere auf der Oberseite und entlang der Längsseite verkratzt bzw. im Bereich der Profilschiene sogar Material abgetragen wurde. Das erschwerte die Reinigung und Desinfektion und verkürzte auch die Lebensdauer des Systems. Kratzer und Abtragungen entstanden insbesondere durch das Aufschieben und Verkanten der Armauflagen, bei Stößen und durch die Verwendung von scheuernden Reinigungsmitteln. Stoßstellen waren insbesondere an den Ecken der Bügelgriffe des CCB2 zu erkennen. Für das CCB3 wurde daher die Möglichkeit geschaffen, defekte Griffe durch Lösen der Schraubenverbindung auszuwechseln. Die Unterseite des CCB2 wies trotz der zahlreichen Umlagerungsvorgänge nur eine geringe Abnutzung auf. Durchstöße oder Risse, die die Sicherheit des Systems gefährden könnten, waren nicht entstanden.

Die Top Coat- Oberfläche war nicht ausreichend kratzfest. Günstig erwies sich die Beschichtung der Oberfläche mit einem kratzfesten zweikomponentigen Acrylatlack. Realisiert wurde eine lichtgraue Beschichtung von ca. 0,3 mm, wodurch das Gewicht etwa 800 Gramm anstieg. Die helle Oberfläche gestattete gegenüber einer schwarzen Sicht- Carbon- Oberfläche eine bessere optische Überprüfung der Sauberkeit und die leichte Erkennung von mechanischen Schäden.

Artefakte

Die Artefakte durch das CCB sind im Bereich CT bei allen getesteten Prototypen äußerst gering und stören die Diagnose nicht (vgl. Abb. A 1). Unterstützt wird dies u. U. auch dadurch, dass der Patient durch die Polsterauflage von dem Liegenelement räumlich getrennt ist.

Im Bereich des konventionellen Röntgens im Schockraum ist das CCB1 nicht einsetzbar, da die innenliegenden Taschen und das Kopfteil zu starke Artefakte verursachen (vgl. Abb. A 1). Beim CCB2 verursacht der seitlich verlaufende Profil- oder Griffbereich sowie die Außenkante der Aufstandfläche auf der Unterseite des Liegenelementes Artefakte (vgl. Abb. A 5). Nicht röntgendurchstrahlbar ist der Halter der Armauflage. Dies erschwert die Aufnahme des Schulterbereiches, da der Patient für diese Aufnahme auf dem Liegenelement verlagert werden muss. Insgesamt ist das CCB2 für den Schockraumbereich gut geeignet. Das Liegenelement des CCB3 ist dem des CCB2 sehr ähnlich. Es sind somit die gleichen Eigenschaften bezüglich der Artefakte zu erwarten.

Diagnosezeiten ohne und mit CCB

Ein Trend der Durchlaufzeitenreduktion konnte in der klinischen Erprobung des CCB2 bereits aufgezeigt werden, Abb. 7-2. Die Studie ist statistisch allerdings noch nicht ausreichend abgesichert.

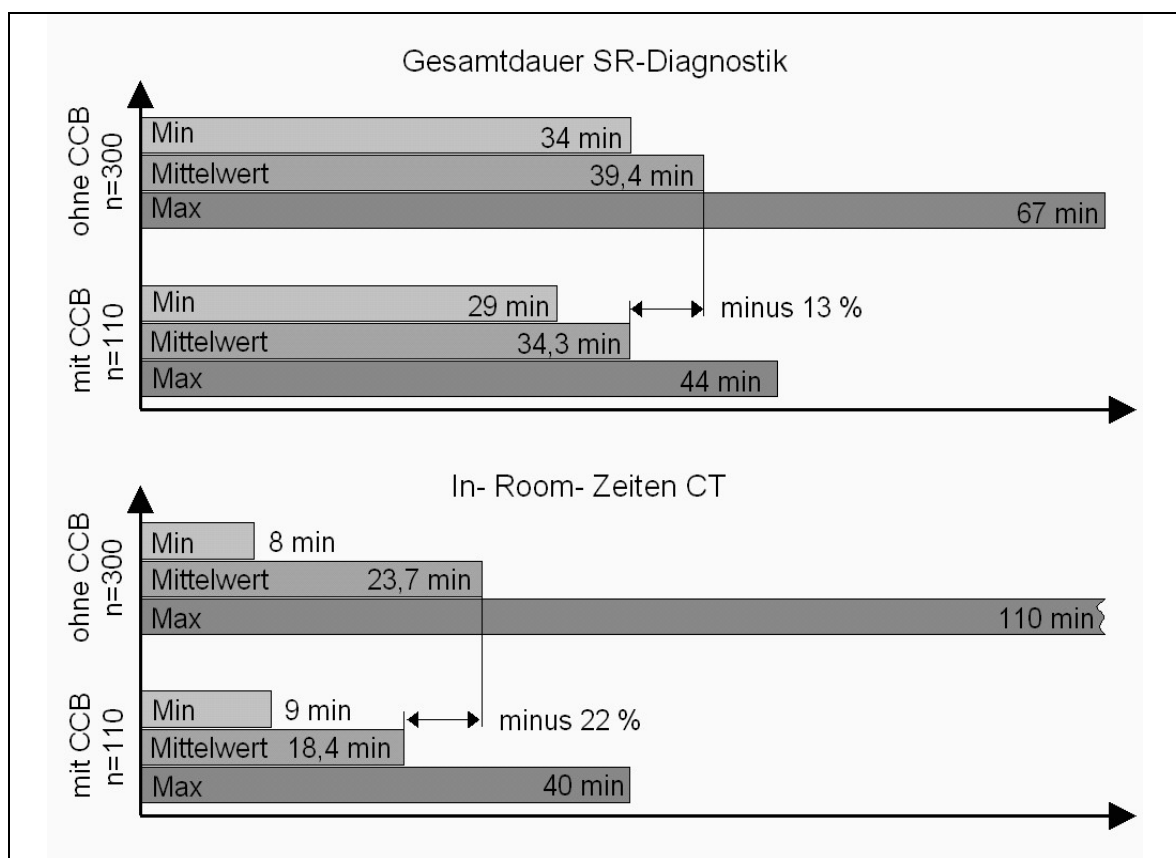


Abb. 7-2: Diagnosezeiten mit und ohne CCB2 für Schockraum- Patienten nach [SCHR02]

Verglichen wurden die Diagnosezeiten von 300 Schockraum- Patienten ohne Verwendung des CCB mit 110 Patienten mit Verwendung des CCB. Es ergab sich bei beiden Stichproben eine sehr ähnliche relative Verteilung der untersuchten Körperregionen. Die Prozesskette wurde bei Verwendung des CCB durchschnittlich um ca. 5 min verkürzt. Das bedeutet für die Verweildauer des Patienten im CT eine relative Zeitreduktion von über 20 %. Weitere Studien werden zukünftig statistisch noch besser gesicherte Aussagen ermöglichen.

7.2 Mechanische Prüfverfahren

Die mechanischen Prüfungen ermöglichen die Bestätigung der Vorauslegungen und gewährleisten damit die Aussage, ob das CCB mit seinen Werkstoffen, Abmessungen und Fertigungsverfahren für den praktischen Betrieb sicher einsetzbar ist. Es werden im Folgenden die Verfahren vorgestellt. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind aus zeitlichen Gründen nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit.

7.2.1 Statische Prüfverfahren in Anlehnung an DIN EN 1865

Die DIN EN 1865 [DIN99] gibt für statische Belastungstests im Bereich von Krankentransportmitteln Standardmessverfahren vor. Für das CCB wurden als Grundlage die Testverfahren für das lange Wirbelsäulenbrett, die Haupttrage und das Tragetuch herangezogen.

7.2.1.1 Biegeprüfung des Liegenelementes

Das Liegenelement wird auf Unterstellböcken gelagert, die 1700 mm Abstand voneinander besitzen. Es erfolgt eine Belastung mit insgesamt 8000 N (Streckenlast $q = 5300 \text{ N/m}$) im Auflagebereich, **Abb. 7-3**. Die dabei auftretende Durchsenkung wird ausgehend von einer festen Bezugsfläche in der Liegenelementmitte gemessen. Die Belastung wird z.B. über Sandsäcke aufgebracht.

Nach der Entlastung darf keine plastische Verformung oder Beschädigung entstanden sein.

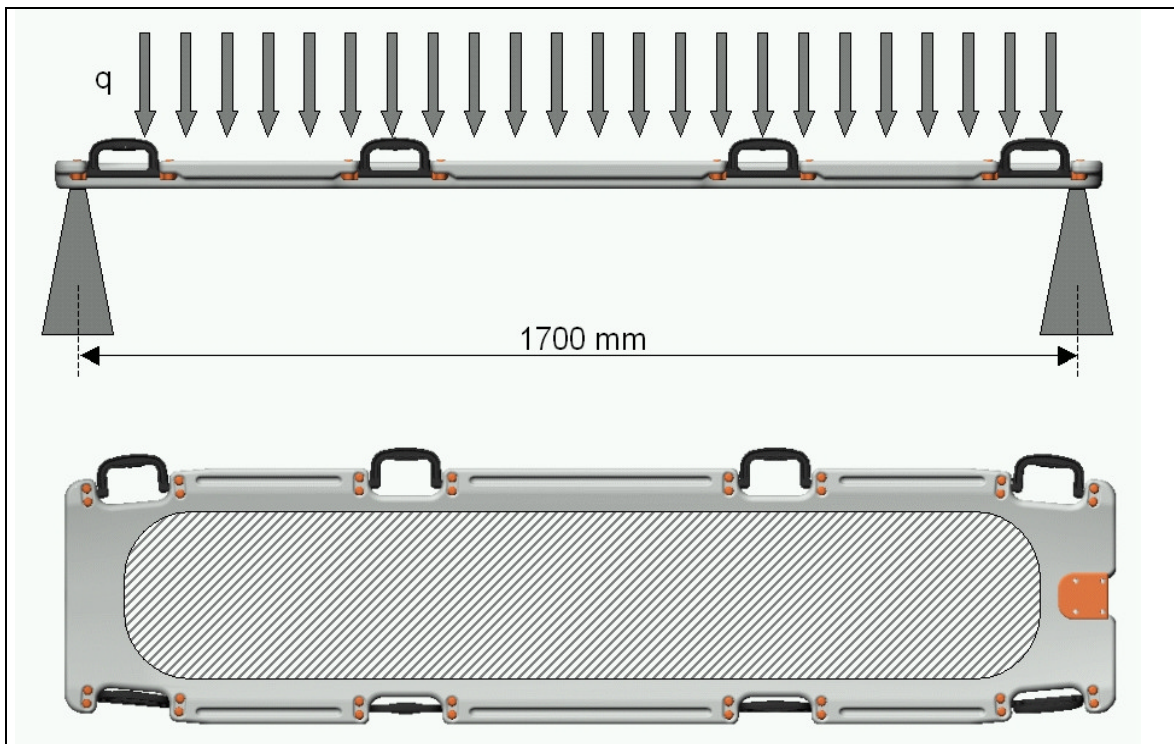


Abb. 7-3: Statische Biegeprüfung des Liegenelementes (schematisch)

Nach [DIN99] beträgt die Maximalbelastung nur 2500 N. Die Testbelastung übertrifft damit bei weitem den in der Norm geforderten Wert.

In einem weiteren Versuch wird das Liegenelement an den Griffen, die sich an Kopf- und Fußende befinden, mit Hilfe von Gurten aufgehängt. Anschließend wird das Gewicht von 800 N erneut aufgebracht. Die Durchsenkung wird ausgehend von einer festen Bezugsfläche am Kopf- und Fußende sowie in der Mitte gemessen.

7.2.1.2 Torsionsprüfung des Liegenelementes

Nach [DIN99] muss über einen Hebelarm ein Moment von 52 Nm auf das eine Ende des CCB aufgebracht werden, während das andere Ende fest eingespannt wird, **Abb. 7-4**. Das Torsionsmoment wird erzeugt mit Hilfe eines Hebels, der 518 mm über den Seitenbereich herausragt, und einer Kraft von 100 N.

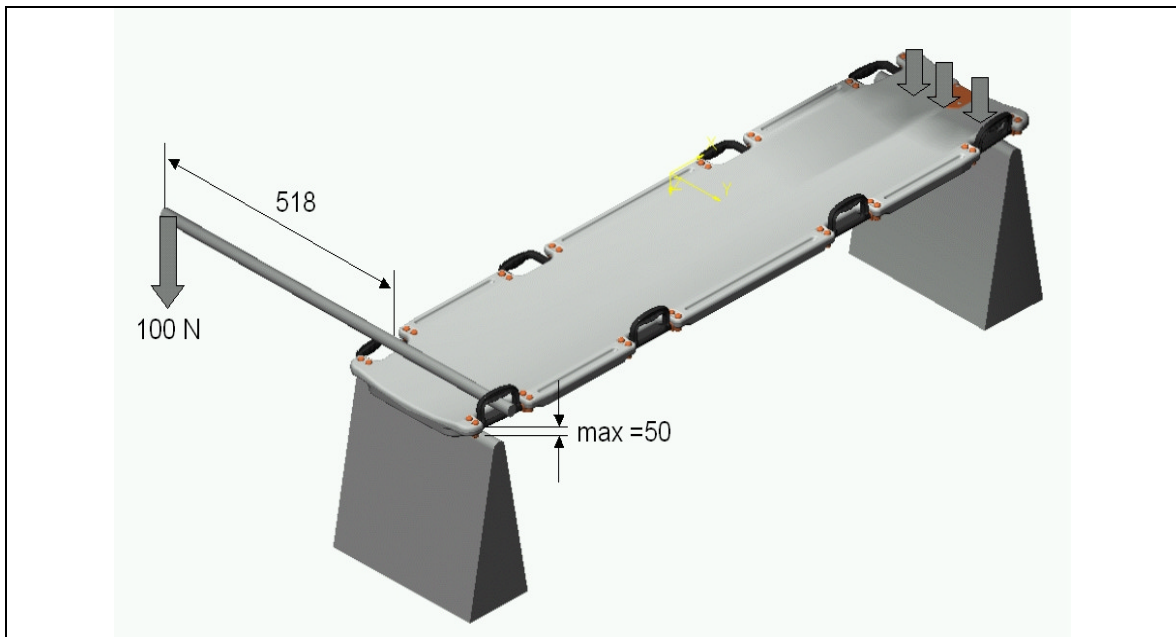


Abb. 7-4: Statische Torsionsprüfung des Liegenelementes (schematisch)

Die lineare Verschiebung des Endes darf nach [DIN99] 50 mm nicht überschreiten. Das CCB muss eine Verschiebung von weniger als 10 mm erreichen. Es darf keine bleibende Verformung nach der Entlastung vorhanden sein.

7.2.1.3 Verformungsprüfung des Liegenelementes

Nach [DIN99] wird in der Mitte der Liegefläche eine Last von 1500 N in Form eines Sandsacks mit 300 mm Durchmesser aufgebracht, **Abb. 7-5**.

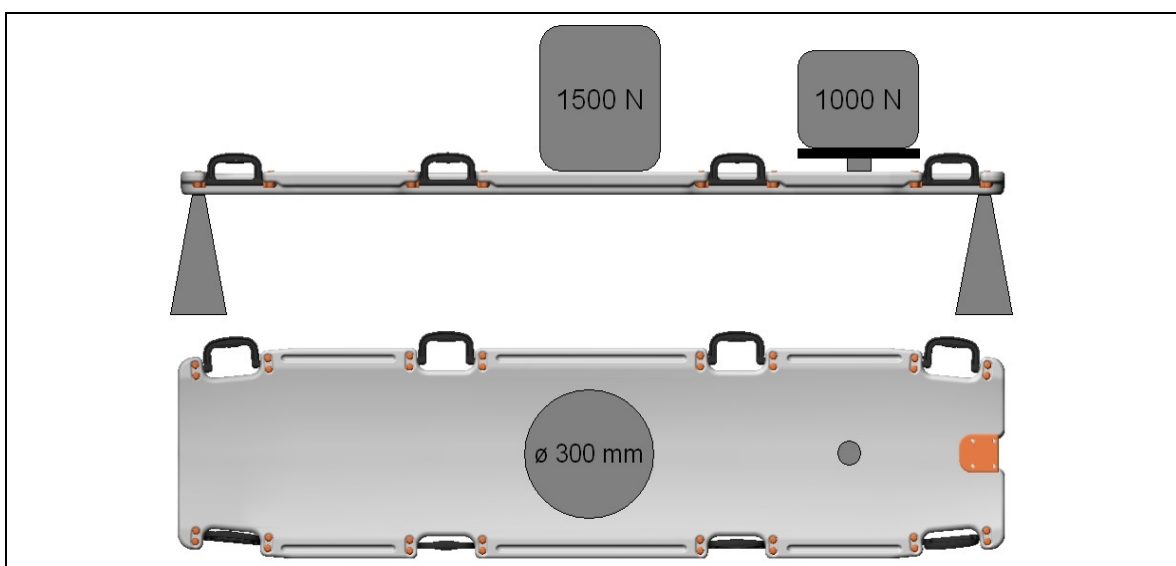


Abb. 7-5: Statische Verformungsprüfung des Liegenelementes (schematisch)

Bei einem weiteren Versuch wird eine Last von 1000 N mit einem kreisförmigen Elastomerkörper von 50 mm Durchmesser aufgebracht. Dies entspricht annähernd der Belastung, die eine auf der Liegefläche stehende Person verursacht. Nach Entlastung darf keine bleibende Verformung vorhanden sein.

7.2.1.4 Zugprüfung des Griffes

Nach [DIN99] lauten die Anforderungen für ein Tragetuch bezüglich der Griffe, dass sie eine Zugkraft von 2500 N ertragen können müssen. Die Zugkraft wird an zwei sich gegenüberliegenden Griffpaaren in einem statischen Versuch aufgebracht. In einem weiteren statischen Versuch müssen die Griffe entlang der Längsachse eine Zugkraft von 1000 N ertragen. Den Versuchsaufbau der statischen Zugkraftprüfung in Querrichtung zeigt **Abb. 7-6**.

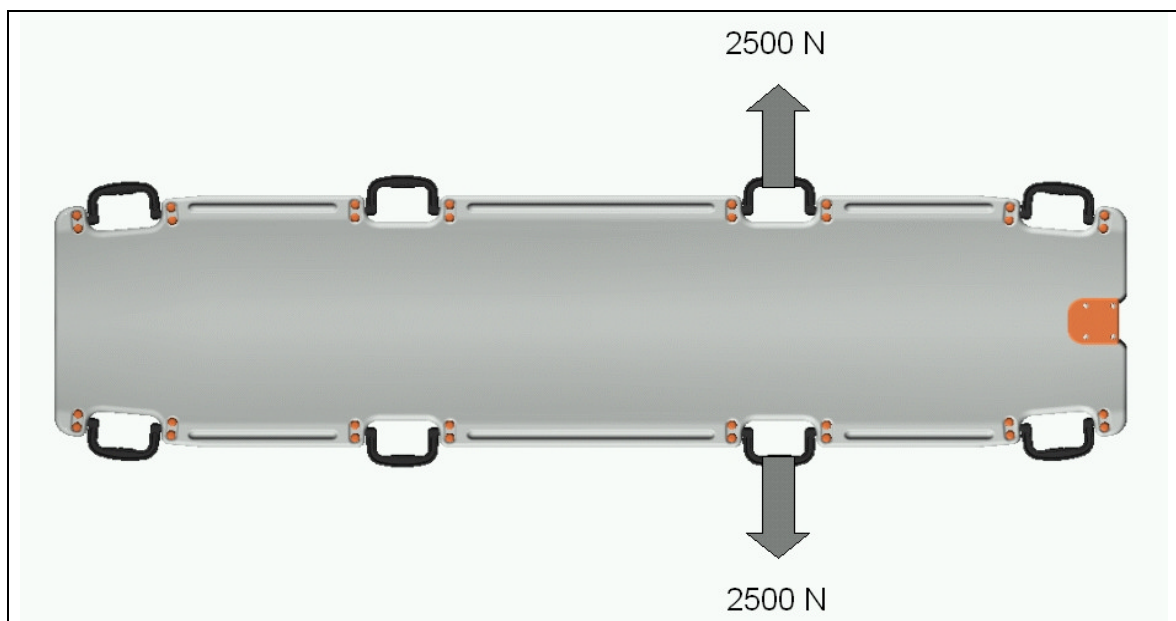


Abb. 7-6: Statische Zugkraftprüfung in Querrichtung (schematisch)

Die Kraft wird über ein 50 mm breites Gurtband auf den Griff aufgebracht und für einen Zeitraum von einer Stunde gehalten. Nach der Entlastung darf keine bleibende Verformung vorhanden sein.

Den Versuchsaufbau der statischen Zugkraftprüfung in Längsrichtung zeigt **Abb. 7-7**.

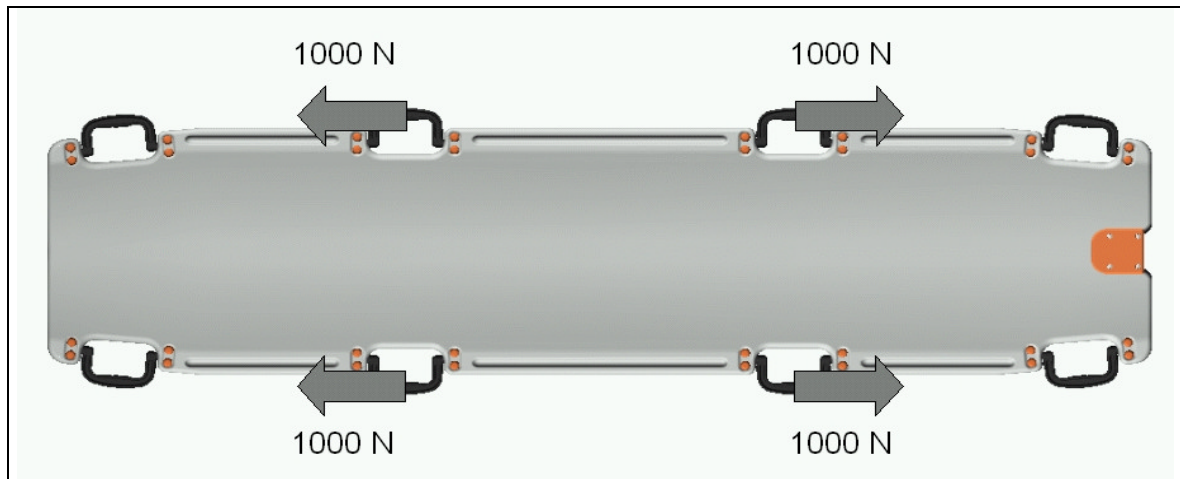


Abb. 7-7: Statische Zugkraftprüfung in Längsrichtung (schematisch)

Der Versuch wird durchgeführt, indem das Liegenelement über einen Zeitraum von einer Stunde an zwei gegenüberliegenden Griffen mit Hilfe von zwei Seilen aufgehängt und anschließend an zwei freien Griffen mit insgesamt 2000 N belastet wird. Nach der Entlastung darf keine bleibende Verformung vorhanden sein.

7.2.2 Statische Prüfung der Anbauteile

Armauflagen

Die Armauflagen sind entsprechend der für den Anwendungsfall notwendigen Festigkeit ausgelegt. Eine Belastung mit 100 N an der Außenkante der Armauflageplatte führt bei senkrechter Abspreizung vom Liegenelement zu deutlich erkennbaren Verformungen. Dadurch wird der Profilbereich des Liegenelementes vor Überlastung geschützt. Bei gleichmäßiger Belastung der Auflageplatte mit 0,14 N/mm (100 N/700 mm) erreicht die Außenkante der Armauflage als maximale Durchsenkung die Höhe der Aufstandsfläche. Den Versuchsaufbau zeigt **Abb. 7-8**.

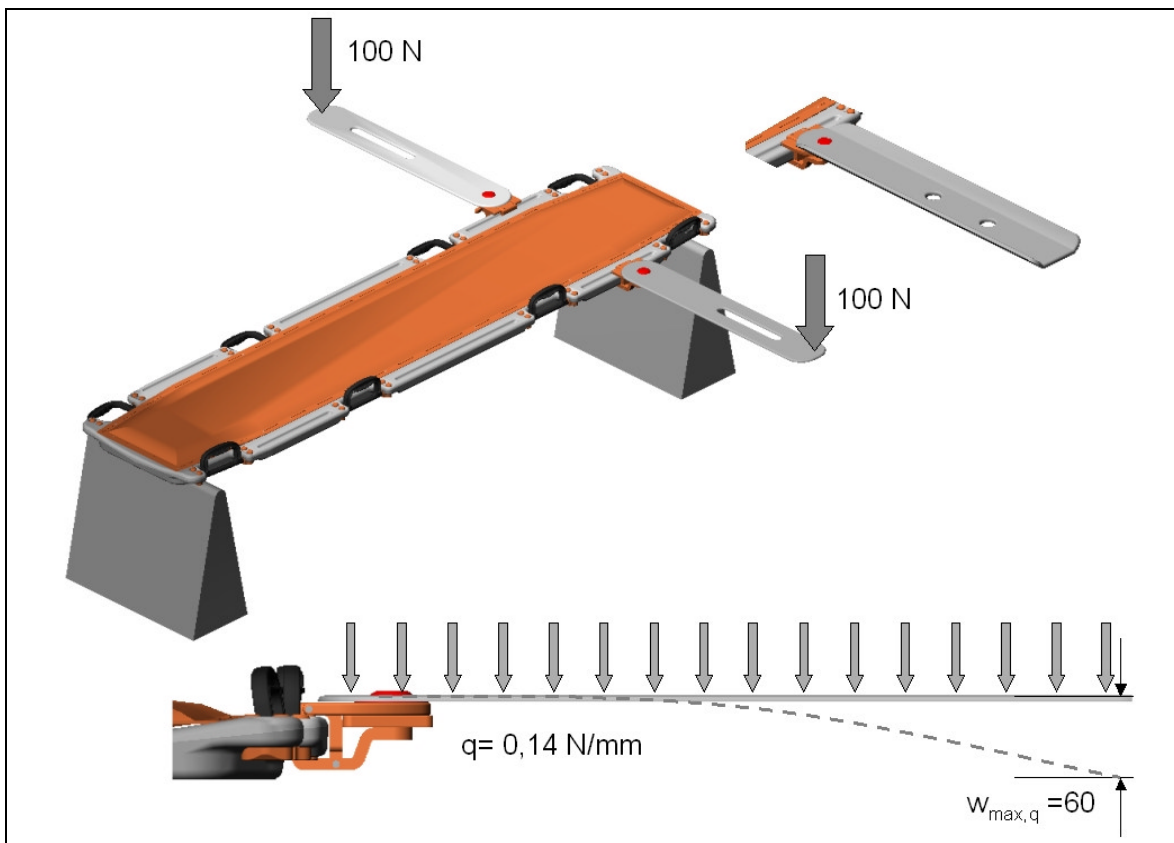


Abb. 7-8: Statische Biegeprüfung der Armauflagen (schematisch)

Kopfhalter

Der Kopfhalter dient dazu, den Kopf einer Person für die CT- Untersuchung auf dem CCB zu fixieren. Weiterhin dient er zur Sicherung des Kopfes während des Transportes. Der Halter muss durch seine Flexibilität eine Anpassung an verschiedene Kopfgrößen ermöglichen, gleichzeitig aber ausreichenden seitlichen Halt geben. Durch die Schrägstellung der Liegefläche kann der Patient geringfügig seitlich verrutschen, wodurch eine Abweichung der Körperachse zur Kopfachse bzw. eine Schrägstellung der Wirbelsäule auftreten kann. Der Kopfhalter muss bei Belastung daher definiert nachgeben.

Die seitliche Belastung ergibt sich aus einer Schrägstellung der Liegefläche und den damit verbundenen Kräftegleichgewicht quer zur Längsachse des Liegenelementes. Als maximal auftretende Querkraft werden 25 N vorgesehen. Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von $S=4$ muss damit eine Maximalkraft von 100 N von dem Kopfhalter in Querrichtung aufgenommen werden können.

Tischaufsatz

Der Tischaufsatz muss das Gewicht der zur Versorgung des Patienten notwendigen Geräte sicher tragen können. Es erfolgt daher für die Prüfung eine Belastung mit 1000 N in senkrechter Richtung.

In zwei weiteren Versuchen wird eine Belastung von 500 N in Längs- oder Querrichtung aufgebracht. Es darf kein Verrutschen in Längsrichtung oder ein Abheben der Füße des Tischaufsatzes von dem Liegenelement auftreten. Das wird durch die Vorspannung der Arretierung und gummierte Aufstandsflächen erreicht.

7.2.3 Dynamische Biegeprüfung des Liegenelementes

Für die dynamische Biegeprüfung wird ein Versuchsaufbau nach **Abb. 7-9** verwendet, wobei eine rein schwellende Belastung von 1500 N in der Mitte des Liegenelementes mit Hilfe einer 150 mm breiten Druckplatte kraftgesteuert aufgebracht wird.

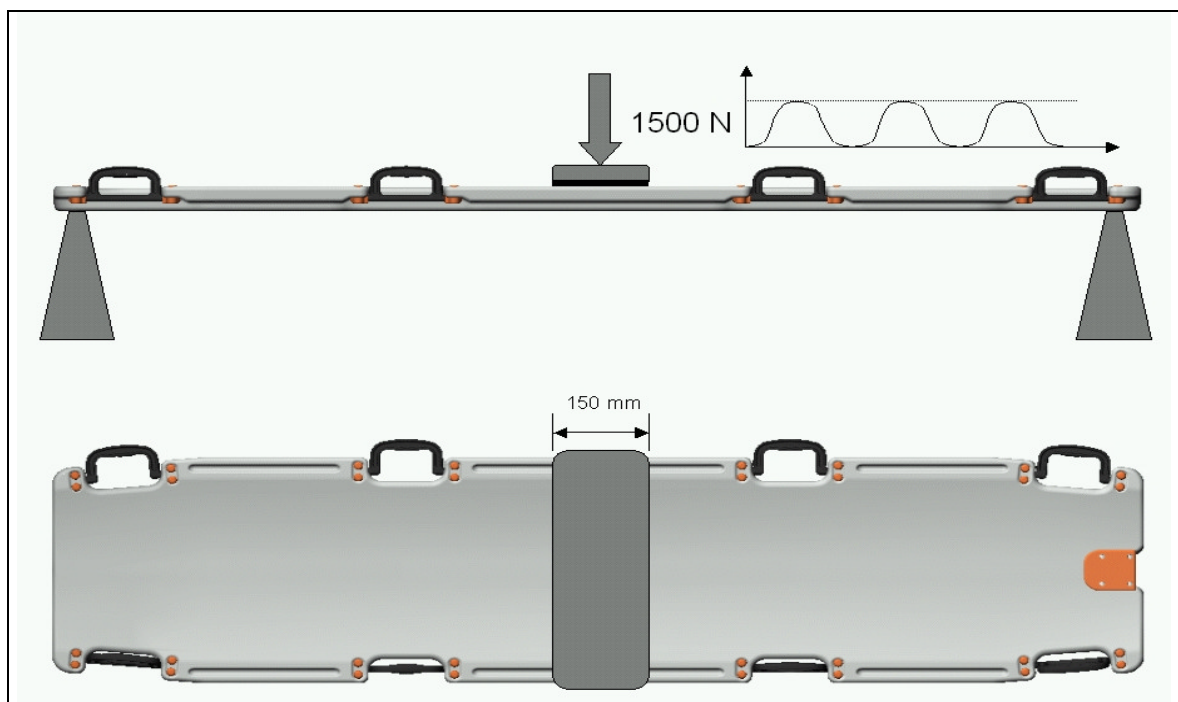


Abb. 7-9: Dynamische Biegeprüfung des Liegenelementes (schematisch)

Die Druckplatte ist auf der Unterseite mit einer 1 mm starken und rutschfesten Elastomermatte versehen. Die Anzahl der notwendigen Lastspiele beträgt $2 \cdot 10^7$. Die Frequenz beträgt maximal 1 Hz. Dies ergibt eine Versuchsdauer von ca. 232 Tagen. Damit während der Prüfung keine Verschiebung des Liegenelementes eintritt, muss dieses mit einer Fest- Loslagerung versehen sein. Dies verhindert außerdem Zwangskräfte im Liegenelement.

Nach der Prüfung dürfen weder eine bleibende Verformung noch Risse vorhanden sein. Während der Prüfung wird die Durchsenkung in der Mitte des Liegenelementes über ein Wegmesssystem protokolliert.

7.2.4 Dynamische Zugprüfung des Griffes

Die dynamische Zugprüfung des Griffes soll zeigen, dass bei Verwendung von CFK nur eine geringe Festigkeitsabnahme im Vergleich zu dem Wert auftritt, der in einem statischen Versuch maximal erreicht wird. Den Versuchsaufbau zeigt **Abb. 7-10**.

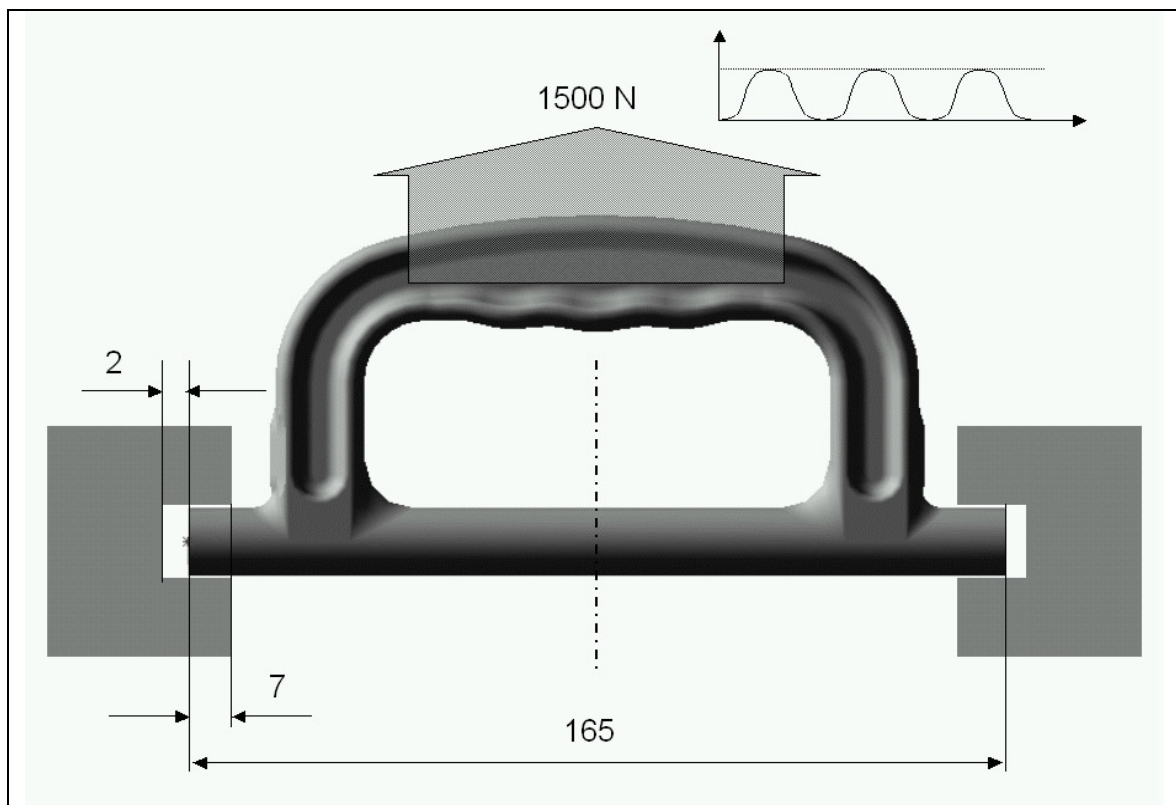


Abb. 7-10: Versuchsaufbau der dynamischen Griffprüfung (schematisch)

Der Griff wird in zwei Gleitlagerbuchsen $\varnothing 14$ drehbar gelagert und mit einer rein schwellenden Zugkraft von 1500 N kraftgesteuert beaufschlagt. Die Anzahl der Lastspiele beträgt $2 \cdot 10^7$. Die Frequenz beträgt 5 Hz. Die Versuchsdauer beträgt ca. 46 Tage. Nach der Entlastung dürfen weder eine bleibende Verformung noch Risse im Griff vorhanden sein, d.h. der Griff muss bis 1500 N dauerfest sein. Während der Prüfung werden die Verformungen direkt am Griff über ein Wegmesssystem protokolliert und es wird die Anzahl der Lastspiele gezählt. In zahlreichen weiteren Versuchen wird die Zugkraft schrittweise gesteigert, bis die Grenze der Dauerfestigkeit erreicht wird. Mit diesen Ergebnissen kann dann ein Wöhler- Diagramm erstellt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Medizinische Prozessketten sind gekennzeichnet durch häufige Ortswechsel mit Umlagerungsvorgängen des Patienten. Für Patienten, die immobil sind oder sich nicht bewegen dürfen, bedeutet jeder Umlagerungsvorgang eine hohe Belastung, es besteht das Risiko weiterer Traumatisierungen. Für das beteiligte Personal entsteht dann eine hohe körperliche Belastung, wenn der Umlagerungsvorgang ohne mechanische Hilfsmittel, die das Patientengewicht halten, erfolgen muss. Der Patient wird einzig durch die Muskelkraft des Personals von Auflagefläche zu Auflagefläche bewegt.

Außer den körperlichen Belastungen entsteht durch das Umlagern ein Zeitverlust, der sich entscheidend vergrößert, wenn zusätzliche Versorgungseinheiten mit umgelagert werden müssen. Dieser Zeitverlust kann im Notfall ein erhöhtes Risiko für den Patienten bedeuten. Im Allgemeinen bedeutet er im Bereich der Diagnosegeräte eine kostenintensive Belegungszeit dieser Geräte. Es ergibt sich damit ein ungünstigeres Verhältnis zwischen der eigentlichen Diagnosezeit und den notwendigen Vorbereitungsmaßnahmen.

Eine Verbesserung der dargelegten Problemstellung liegt in der Verwendung eines Auflagesystems, auf das der immobile Patient von Beginn der Behandlung gebettet wird und während aller Diagnose- und Behandlungsschritte sowie der dafür notwendigen Umlagerungsvorgänge auch verbleibt und gleichzeitig auch versorgt wird. Die Entwicklung eines solchen Systems ist Gegenstand dieser Arbeit.

Das Liegenelement des Auflagesystems ist so gestaltet, dass eine Verwendung mit allen in der Analyse aufgezeigten medizinischen Geräten möglich ist. Dies schließt sowohl die rein geometrischen als auch die funktionalen und technischen Anforderungen ein. Insbesondere die optimale Röntgenkompatibilität ist unter Einhaltung der Gewichts- und Festigkeitsanforderungen durch den Einsatz von kohlefaserverstärkten Kunststoffen gewährleistet. Die Auslegung erfolgte durch

rechnerische Optimierung in früher Projektphase und spätere praktische Versuche.

Außer der Verwendung des Liegenelementes ist es notwendig, dass zusätzliche Versorgungseinheiten mitgeführt bzw. befestigt werden können. Dafür weist das Liegenelement an den Längsseiten angeformte Profilschienen auf. Die in dieser Arbeit außerdem entwickelten Anbauteile sind der Tischaufsatz, die Armauflagen, der Kopfhalter und die Polsterauflage.

Der Tischaufsatz ist an dem Liegenelement mit Hilfe eines Schnellverschlusssystems montierbar. An dem Tischaufsatz lassen sich alle notwendigen Einheiten über die im medizinischen Bereich üblichen Profileleisten montieren. Dies gewährleistet die Kompatibilität zu bestehenden stationären Zubehörelementen wie beispielsweise Infusionshaltern.

Im Bereich des Schockraumes sind die Armauflagen notwendig, um die Arme vom Körper des Patienten abstrecken zu können. Für diesen Zweck wurden Armauflagen entwickelt, die über ein Schnellspannsystem an der Profilschiene des Liegenelementes montiert werden können. Diese sind schwenkbar und klappbar.

Im Bereich der CT und für den Transport ist die stabile Lagerung des Kopfes notwendig. Dies gewährleistet das definiert flexibel ausgelegte und durchstrahlbare Kopfteil.

Es ist bekannt, dass ein hartes Liegenelement keinen ausreichenden Komfort für einen längeren Transport gewährleisten kann. Es wurde daher zusätzlich eine an die geometrischen Bedingungen angepasste, definiert weiche und röntgenkompatible Polsterauflage entwickelt, die weitere Traumatisierungen in dem zeitlich begrenztem Rahmen der Verwendung vermeidet.

Die klinische Evaluierungsphase mit Funktionsprototypen hat gezeigt, dass die Verwendung eines solchen Systems die Ergonomie des Umlagerungsvorganges insbesondere für den Patienten verbessert. Für das medizinische Personal ergibt sich eine Verbesserung dadurch, dass das Liegenelement im Gegensatz zu einem Laken sehr steif ist und so der Patient leichter umgelagert werden kann. Die hohe Steifigkeit des Liegenelementes ermöglicht außerdem Umlagerungsvorgänge in beliebiger Richtung. Im Bereich der Griffe montierbare Griffschlaufen gestatten auch die Überbrückung von größeren Strecken bei Umlagerungsvorgängen.

Das Risiko weiterer Traumatisierungen des Patienten wird durch dessen stabile Lagerung auf dem Auflagesystem während der Umlagerungsvorgänge vermindert. Gleichzeitig wird beim Umlagerungsvorgang Zeit eingespart, wodurch u. a. auch die Kosten im Bereich CT gesenkt werden können. Die Integration in die bestehende medizinische Technik ist dabei mit geringem Aufwand möglich.

Die klinische Evaluierungsphase hat außerdem gezeigt, dass zwar eine volle Integration in bestehende medizinische Abläufe möglich ist, aber dennoch das Personal auf die eigene Muskelkraft angewiesen ist, um den Umlagerungsvorgang zu ermöglichen. Es ist daher sinnvoll, ein weiteres System zu entwickeln, welches den Transport und die Patientenumlagerung ohne hohe mechanische Beteiligung des Personals in kurzer Zeit ermöglicht.

9 Literaturverzeichnis

- [ALC03] N.N.: Numerische Prozessmodellierung der Alcan AG.
Vorlesung an der ETH Zürich vom 15.01.03.
- [BAR94] Bargel, H.-J. u. Schulze, G. (Hrsg.): Werkstoffkunde.
6. Aufl., Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- [BERG02] Bergers, D.: Produktentwicklung 2, Rapid und Virtual
Prototyping. Skript zur Vorlesung, Universität Duisburg- Essen
am Standort Duisburg 2002.
- [BGBL96] Bundesgesetzesblatt 1, S.1246:
Lastenhandhabungsverordnung (Lasthandhabv) zum
Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) vom 07.08.1996.
- [BRAS01] Brast, K.: Verarbeitung von langfaserverstärkten
Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren.
Dissertation RWTH Aachen 2001.
- [BRO89] Bronstein, I. N.: Taschenbuch der Mathematik.
24. Auflage, Frankfurt: Verlag Harri Deutsch 1989.
- [BRU03] Bruckenberger, E.: Standortplanung für den wirtschaftlichen
Einsatz von Großgeräten.
<http://www.bruckenberger.de/frame.htm?mtgbonn.htm>
(15.01.03)
- [BGR132] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften,
Fachausschuss „Chemie“: BGR 132 Richtlinien für die
Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer
Aufladungen -Richtlinie "Statische Elektrizität " - (bisher ZH
1/200). Sankt Augustin, 1989.

-
- [DIN94] DIN EN 1021: Möbel; Bewertung der Entzündbarkeit von Polstermöbeln. Berlin: Beuth - Verlag 1994.
- [DIN97] DIN EN 60601-2-33, Teil 2 (Juni 1997): Medizinische elektrische Geräte, Teil 2: Besondere Festlegungen für die Sicherheit von medizinischen diagnostischen Magnetresonanzgeräten. Berlin: Beuth Verlag 1997.
- [DIN98] DIN 4102: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Berlin: Beuth Verlag 1998.
- [DIN99] DIN EN 1865: Festlegung für Krankentragen und andere Krankentransportmittel im Krankenkraftwagen. Berlin: Beuth Verlag 1999.
- [DKG03] Deutsche Krankenhaus- Gesellschaft: Krankenhausstatistik, Grunddaten der Krankenhäuser 2000.
http://www.dkgev.de/1_edv/edv-2002_001.htm (15.01.03)
- [DKVG01] Deutsche Krankenhausverlagsgesellschaft mbH: telefonische Auskunft zur Anzahl der europäischen Krankenhäuser. Düsseldorf, 2001.
- [DOM92] Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 4. Auflage Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1992.
- [EHR92] Ehrenstein, G.: Faserverbund- Kunststoffe. 1. Auflage München, Wien: Hanser Verlag 1992.
- [FER99] Ferno GmbH: Emergency Patient Handling. Troisdorf 1999.
- [FLE94] Flemming, T.: Vergleich der mechanischen Eigenschaften und des Umformverhaltens zwischen gerichteten kurz- und langfaserverstärkten Thermoplasten. Dissertation TU- München, 1994.
- [FLE95] Flemming, M., Ziegmann, G. u. Roth, S.: Faserverbundbauweisen, Fasern und Matrices. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1995.

-
- [FLE96] Flemming, M., Ziegmann, G. u. Roth, S.: Faserverbundbauweisen, Halbzeuge und Bauweisen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer- Verlag 1996.
- [HES99] Hesser, J.: Vorlesung Bildgebende Diagnostik.
<http://www-li5.ti.uni-mannheim.de/~hesser/BildgebendeSysteme/bildgebende%20Systeme/Ws0203/Skript1.pdf>. (28.01.03)
- [IDA88] Kickert, R.: Dimensionierungsrichtwerte für den Segel- und Motorsegelflugzeugbau. Akaflieg Braunschweig 1988.
- [JAN89] Janda, R.: Kunststoffverbundsysteme, Grundlagen, Anwendung, Verarbeitung, Prüfung. Weinheim, Basel (Schweiz), Cambridge, New York: VCH-Verlag 1989.
- [KOL98] Koller, R., Kastrup, N.: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer- Verlag 1998.
- [LAN02] Lange, W., Windel, A.: Kleine ergonomische Datensammlung. 8. Aufl. Köln: TÜV-Verlag GmbH 2002.
- [LIN01] Linsenmaier, U., Krötz, M. u.a.: Evaluation von Wirbelsäulenbrettern für die Röntgendiagnostik. Fortschr. Röntgenstr. 2001; 173: S1041-S1047.
- [MAQ02] Maquet AG: Produkte 2002.
<http://www.maquet.de> (20.11.2002).
- [MWW03] N.N.: Aufbau und Funktion einer Röntgenröhre. A Med- World AG, Berlin. <http://www.m-ww.de/enzyklopaedie/strahlenmedizin/roentgenstrahlung.html> (28.02.03).
- [MIC90] Michaeli, W., Wegener, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1990.
- [MIC92] Michaeli, W., Greif, H. u. a.: Technologie der Kunststoffe. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1992.

-
- [MIC95] Michaeli, W., Huybrechts, D. u. a.: Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1995.
- [MIK01] Mikitisin, P.: Kohlefaserverstärkte Kunststoffe. Gerhard-Mercator-Universität, Gesamthochschule Duisburg, <http://mb127.uni-uisburg.de/wt/cfk/doc.htm> (02.04.01).
- [MOS92] Moser, K.: Faser- Kunststoff- Verbund. Düsseldorf: VDI- Verlag 1992.
- [PAHL97] Pahl, G. , Beitz, W.: Konstruktionslehre Methoden und Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1997.
- [PET00] Pethe, J.: Tomographische Verfahren Röntgen- Computertomographie Magnetresonanz-Tomographie. <http://www.med.uni-magdeburg.de/fme/khno/audio/studium/cv/Pethe-CV-Skript.doc> (21.01.03).
- [PUC96] Puck, A: Festigkeitsanalyse von Faser- Matrix- Laminaten. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1996.
- [TUHH02] Technische Universität Hamburg-Harburg: Rußgefüllte Polymere. http://www.tu-harburg.de/et7/forschung/russ_polymer/verbund_d.html (20.11.2002).
- [RGP02] N.N.: Faserverbundwerkstoffe, Preisliste 2002. R&G GmbH, Waldenbuch, 2/2002.
- [RIW40] KERN Riweta Material Selector, Version 4.0. Kern GmbH, Großmaischeid 1996-2002.
- [RUG02] N.N.: Handbuch der Faserverbundwerkstoffe. R&G GmbH, Waldenbuch, 2. Auflage 2001/2002.
- [RUG03] N.N.: Handbuch der Faserverbundwerkstoffe. R&G GmbH, Waldenbuch, Ausgabe 03/2003.
- [RKI02] Robert-Koch-Institut: Desinfektionsmittelliste. <http://www.rki.de/GESUND/DESINF/DESINFEKTIONSMITTELLISTE.PDF> (20.11.2002).

-
- [SCHR02] Schröder, T., Ruchholtz, S.: Evaluation of a new patient transfer board (PTB) for diagnostic ER-/ICU-patient-management in diagnostic CT. Vortrag 14. Europäischer Radiologen Kongress (ECR), Wien 2002.
- [STA03] Stachel, P., Schäfer, C., Stieg, J.: Innovative CFK-Technologie für höhere Stückzahlen. Kunststoffe 04/2003 62-65. Carl Hanser Verlag München.
- [STRA03] Stracke, H.-J.: CAD II, fortgeschrittene CAD- Anwendungen. Skript zur Vorlesung, Universität Duisburg-Essen am Standort Essen 2003.
- [VDI97] VDI- Richtlinie 2014: Entwicklung von Bauteilen aus Faser- Kunststoff- Verbund. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.
- [WISS03] Wissussek, D., Veh, U.: Ablaufgeregelte Entwurfsphase im Produktentwicklungsprozess. TM- Technische Mitteilungen 96 (2003) Nr. 2, S. 94-101.

10 Anhang

Gliederung:

Abb. A 1: Artefakte des CCB1 beim konventionellen Röntgen

Abb. A 2: Artefakte des CCB1 beim konventionellen Röntgen

Abb. A 3: Artefakte des CCB1 im CT (Schnittbild)

Abb. A 4: Topogramm des CCB1 mit Patient im CT

Abb. A 5: Artefakte des CCB2 beim konventionellen Röntgen

Abb. A 6: Darstellung CCB3

Tab. A 1 - Tab. A 3: Eigenschaften von FKV- Fertigungsverfahren

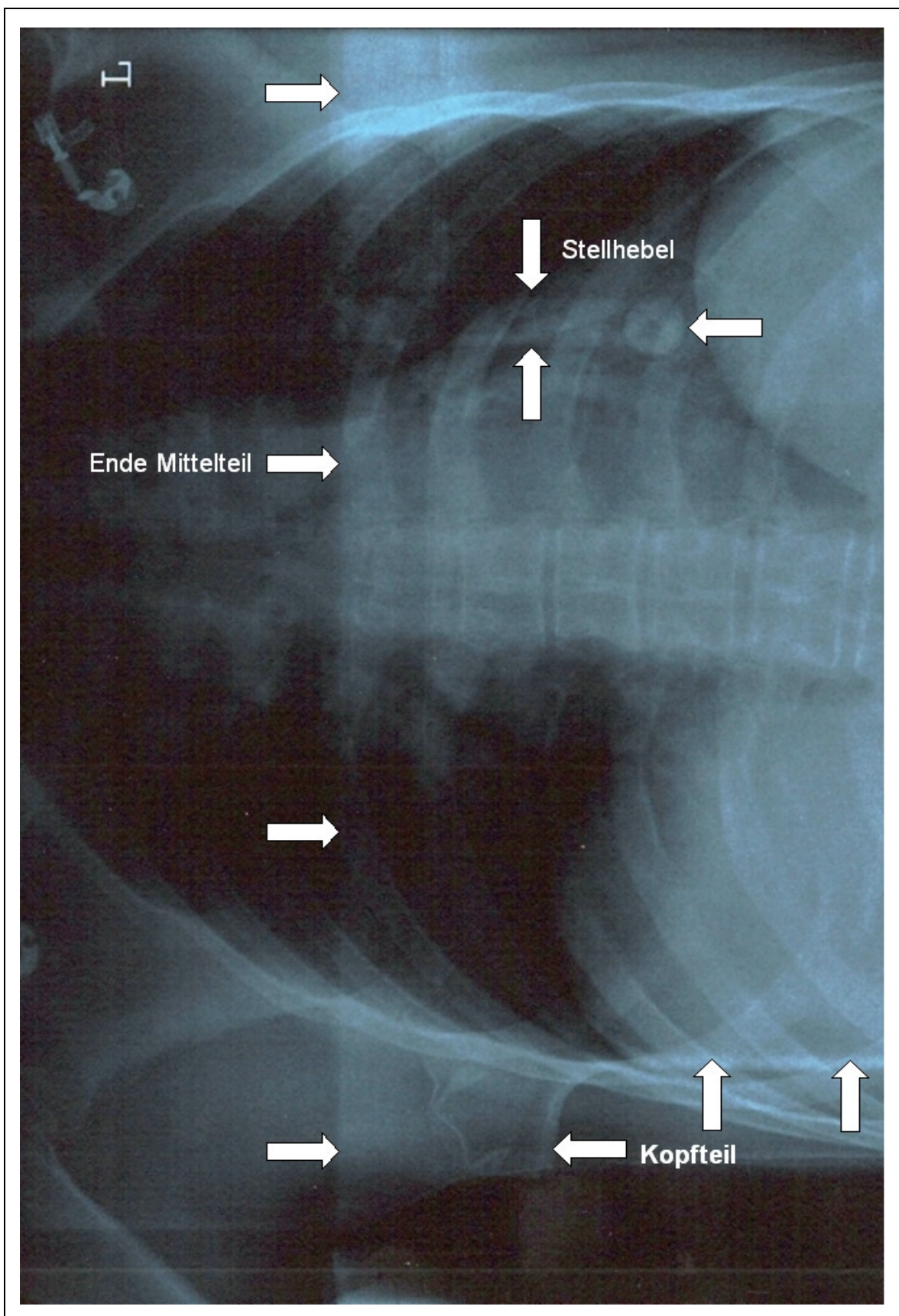


Abb. A 1: Artefakte des CCB1 beim konventionellen Röntgen

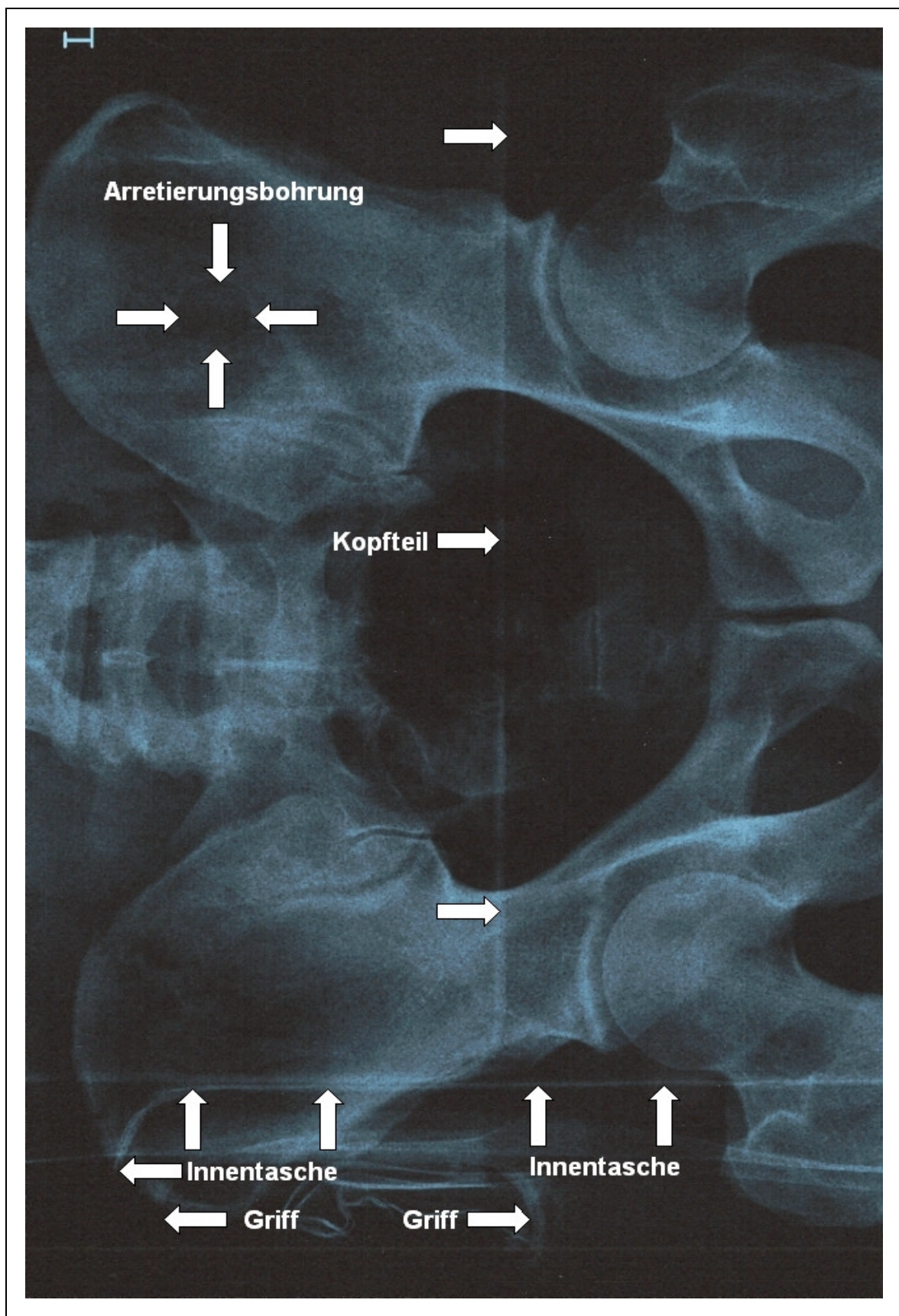


Abb. A 2: Artefakte des CCB1 beim konventionellen Röntgen

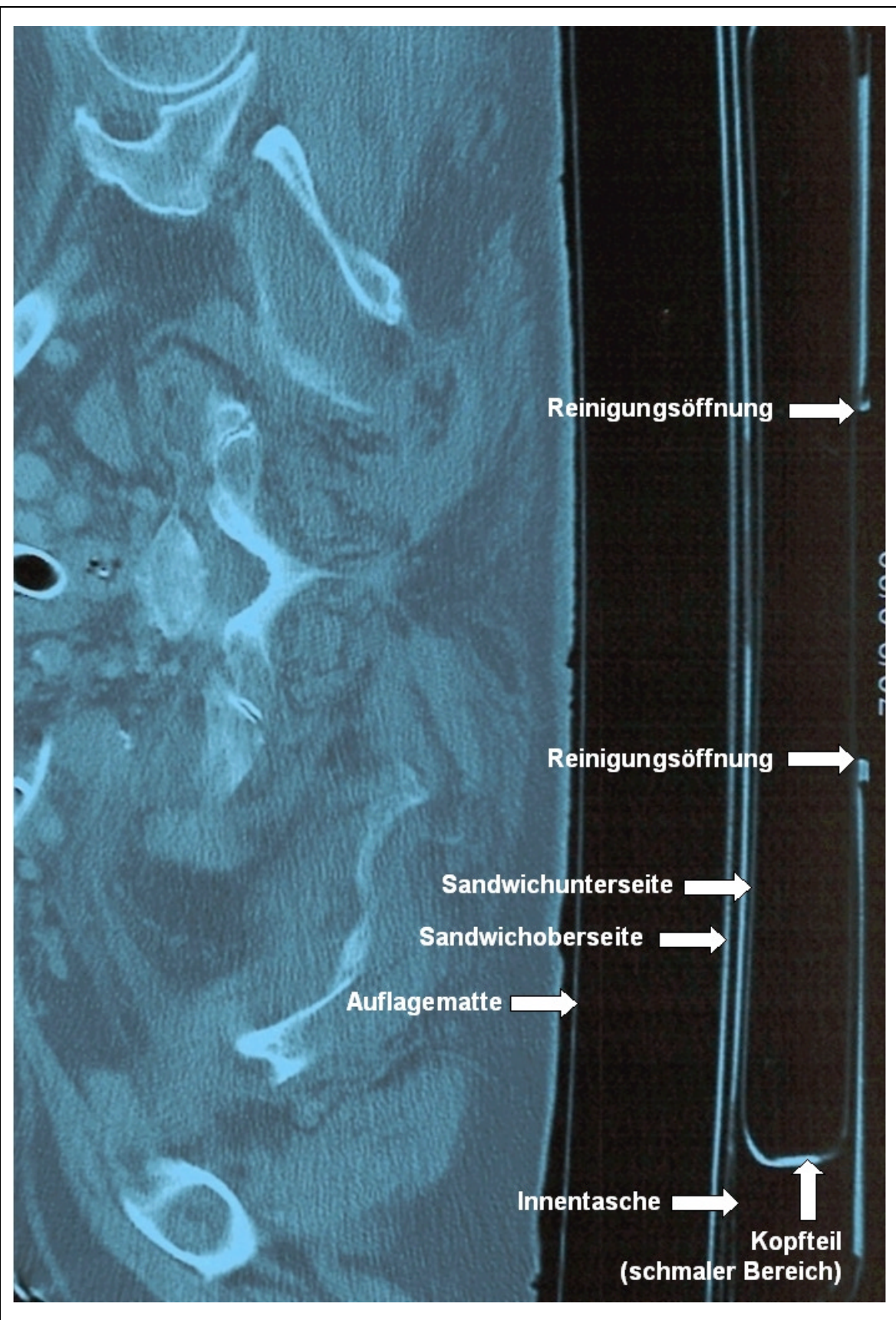


Abb. A 3: Artefakte des CCB1 im CT (Schnittbild)

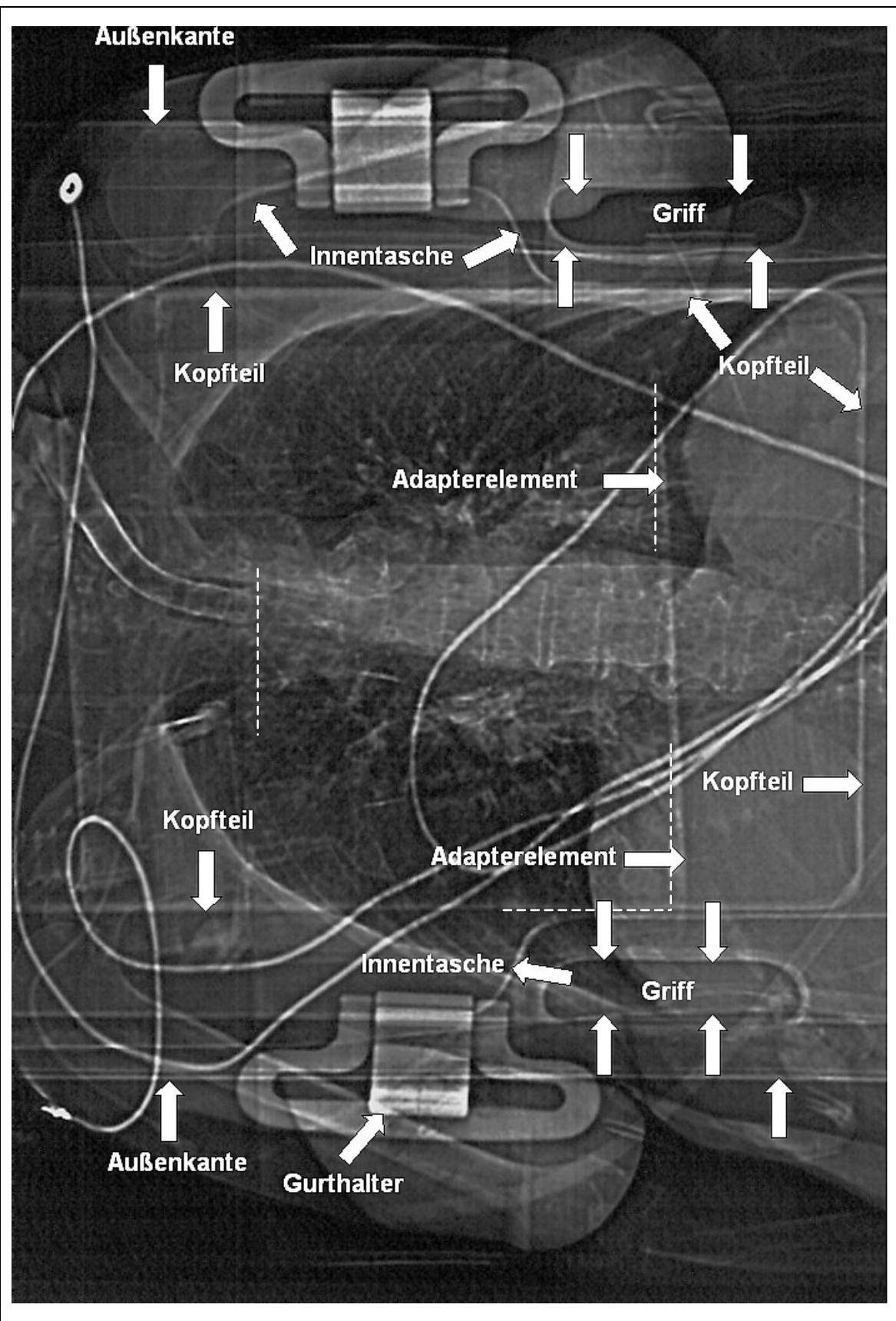


Abb. A 4: Topogramm des CCB1 mit Patient im CT

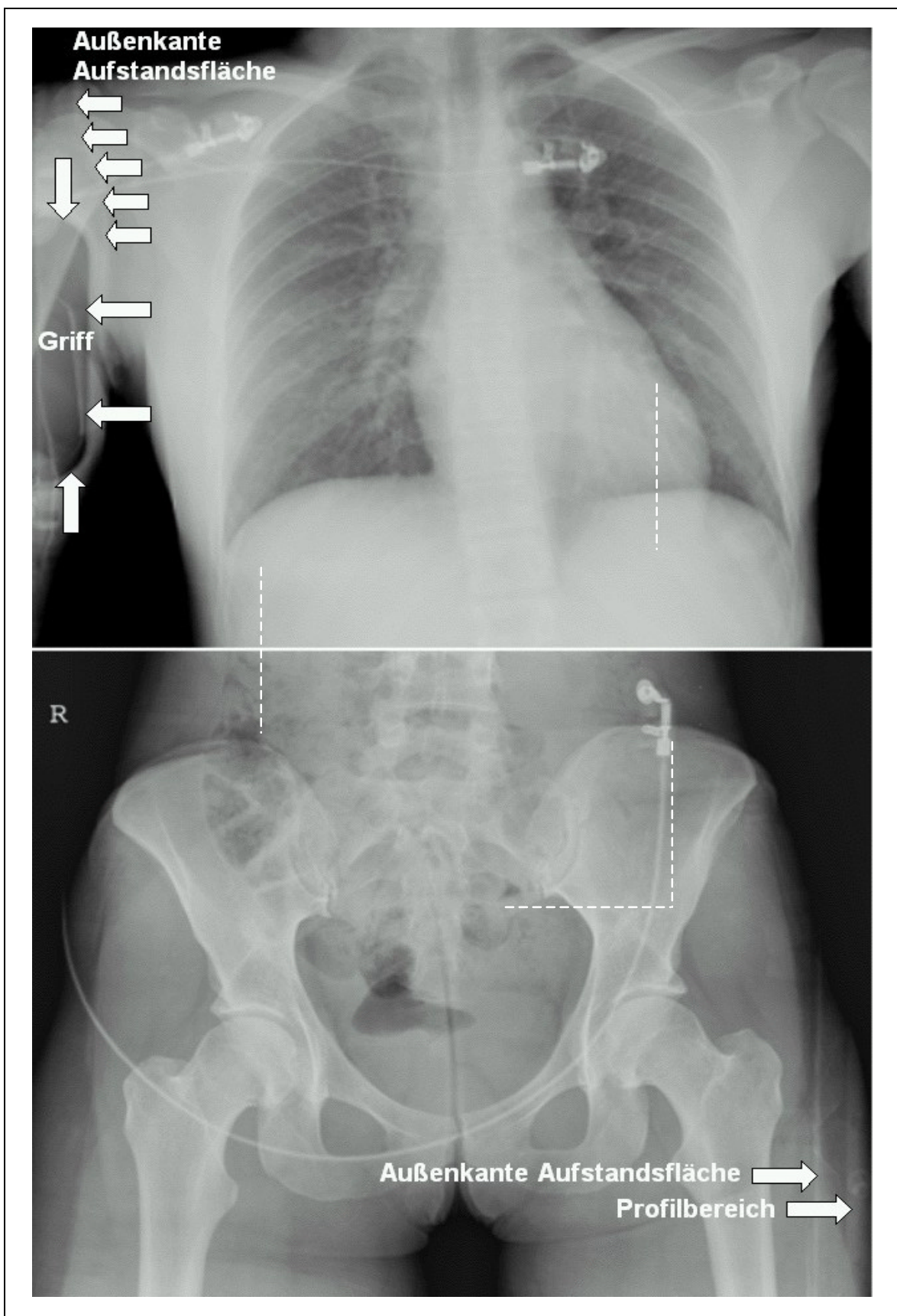


Abb. A 5: Artefakte des CCB2 beim konventionellen Röntgen



Abb. A 6: Darstellung CCB3

Eigenschaften	Hand- und teilmechanische Verfahren			
	Handlaminieren	Vakuumpressen	Faser / Harz-Spritzen	Resin-Transfer-Moulding
Investitionskosten	gering	mittel	mittel	gering bis mittel
Lohnkosten	sehr hoch	hoch	hoch	mittel bis hoch
wirtschaftliche Stückzahl	1-1000	klein bis mittel	100-10000	500-10000
wirtschaftliche Teilegröße	1-30 m ²	bis 10 m ² üblich	1-10m ²	0,1-2m ²
Verarbeitungsdruck	<0,1 bar	<0,9 bar	<0,1 bar	0,1-20 bar
Verarbeitungstemperatur	290-300 K	290-300 K	290-300 K	290-300 K
Hinterschneidungen	geteilte Formen	geteilte Formen	geteilte Formen	geteilte Formen
Mindestradien	> 1mm	ca. 0,5 mm	5 mm	5 mm
Wanddicken	0,1-10 mm	0,1-5 mm	2-10 mm	3-15 mm
Wanddickensprünge	möglich	möglich	möglich	möglich
Wanddickentoleranz	Matten bis 50%, Gewebe bis 20%	Matten bis 50%, Gewebe bis 20%	bis 80% unvermeidlich	5%
Faser-Volumenanteil	bis 50 %	>80 %	bis 20 %	bis 80%
Faserorientierung	möglich	möglich	nicht möglich	möglich
Luftporengehalt	1-3 %	0-2%	2-3 %	0-2%
Deckschicht	einseitig üblich	einseitig glatt	einseitig üblich	unüblich
Oberfläche	einseitig glatt	einseitig glatt	einseitig glatt	beidseitig glatt
Durchbrüche	möglich	möglich	möglich	möglich
Einlegeteile	möglich	möglich	möglich	möglich
Sicken	möglich	möglich	möglich	möglich
Rippen	möglich	möglich	möglich	möglich
Nachbearbeitung	besäumen	besäumen	besäumen	besäumen

Tab. A 1: Eigenschaften von FKV- Fertigungsverfahren (nach [RUG02, S.24] und [VDI97, Blatt 2 S.12-14])

Eigenschaften	Diskontinuierliche Verfahren						
	Kaltpress- verfahren	Heißpressen					Wickeln
		Nass- pressen	Prepreg	Premix	Rieself. Form- massen	Spritzguss Duroplast	
Investitionskosten	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Lohnkosten	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering
wirtschaftliche Stückzahl	500-10000	10000- 100000	50000- 250000	50000- 250000	90000- 500000	50000- 250000	500- 3000
wirtschaftliche Teilegröße	0,1-10m²	0,1-5 m²	0,01-1m²	0,01- 0,1m²	0,01- 0,1m²	<0,1 m²	d= 0,8-5m
Verarbeitungs- druck	0,4-1 bar	0,5-3 bar	3-15 bar	10-20 bar	30-60 bar	90-120 bar	<0,1 bar
Verarbeitungs- temperatur	290-310 K	420 K	420 K	400- 440K	415- 440 K	380- 400 K	290- 300 K
Hinter- schneidungen	bedingt möglich	bedingt möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	bedingt möglich
Mindestradien	3	>3	innen 0,8, außen 2	>0,5 mm	>0,5 mm	>0,5 mm	ca. 10 mm
Wanddicken	2-8 mm	2-8 mm	1,5-6 mm	1,5-6 mm	2-30 mm	2-10 mm	1-10 mm
Wanddicken- sprünge	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
Wanddicken- toleranz	5%	5%	1-3 %	1-3 %	0,10%	0,10%	bis 20 %
Faser- Volumenanteil	hoch	hoch	bis 80 %	hoch	einstellbar	einstellbar	bis % 70
Faserorientierung	möglich	möglich	möglich	möglich	bedingt möglich	bedingt möglich	möglich bis ca.
Luftporengehalt	sehr niedrig	sehr niedrig	sehr niedrig	sehr niedrig	gegen 0	gegen 0	0,5-2%
Deckschicht	unüblich	unüblich	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	unüblich
Oberfläche	beidseitig glatt	beidseitig glatt	beidseitig glatt	beidseitig glatt	beidseitig glatt	beidseitig glatt	einseitig glatt
Durchbrüche	nicht möglich	nicht möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	nach- träglich
Einlegeteile	möglich	nicht möglich	möglich bei Vor- wärmung	möglich bei Vor- wärmung	möglich bei Vor- wärmung	möglich bei Vor- wärmung	nach- träglich üblich
Sicken	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	nicht möglich
Rippen	möglich (Nacharbeit)	bedingt möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
Nachbearbeitung	trennen	trennen	trennen	trennen	trennen	trennen	trennen

Tab. A 2: Eigenschaften von FKV- Fertigungsverfahren (nach [RUG02, S.24] und [VDI97, Blatt 2 S.12-14])

Eigenschaften	Kontinuierliche Verfahren		
	Platten-laminierverfahren	Rohr-Nass-Wickelverfahren	Strangziehen
Investitionskosten	hoch	hoch	hoch
Lohnkosten	gering	gering	gering
wirtschaftliche Stückzahl	>250000m ² / Jahr	-	L>500 km/Jahr
wirtschaftliche Teilegröße	-	d=0,3-3m	<0,01 m ²
Verarbeitungsdruck	<0,1 bar	<0,1 bar	<0,1 bar
Verarbeitungstemperatur	370-390 K	370-390 K	370-390 K
Hinterschneidungen	möglich	bedingt möglich	in Ziehrichtung
Mindestradien	5	10	1
Wanddicken	1-3 mm	üblich 1-10 mm	0,5-20 mm
Wanddickensprünge	nicht möglich	möglich	in Ziehrichtung möglich
Wanddickentoleranz	bis 20 %	bis 20 %	bis 10 %
Faser-Volumenanteil	hoch	hoch	bis 80 %
Faserorientierung	möglich	möglich	Rovings+Bänder
Luftporengehalt	sehr niedrig	sehr niedrig	0-2%
Deckschicht			nicht möglich
Oberfläche	beidseitig glatt	einseitig glatt	allseitig glatt
Durchbrüche	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich
Einlegeteile	nicht möglich	möglich	nicht möglich
Sicken	nicht möglich	nicht möglich	möglich
Rippen	nicht möglich	nicht möglich	möglich
Nachbearbeitung	trennen	trennen	trennen

Tab. A 3: Eigenschaften von FKV- Fertigungsverfahren (nach [RUG02, S.24] und [VDI97, Blatt 2 S.12-14])